Die Farbe der Seen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

Hohen philosophischen Fakultät II. Sektion

der

Kgl. bayer. Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt am 8. Juni 1903

von

Otto Freiherrn von und zu Aufsess.

München 1903.
Kgl. Hof- und Universitäts-Buchdruckerei von Dr. C. Wolf & Sohn.

Die Farbe der Seen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

Hohen philosophischen Fakultät II. Sektion

der

Kgl. bayer. Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt am 8. Juni 1903

von

Otto Freiherrn von und zu Aufsess.

AGRAR. LANDWIRT BIBL.

München 1903.

Kgl. Hof- und Universitäts-Buchdruckerei von Dr. C. Wolf & Sohn.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552325_0018

Einleitung.

Die Untersuchungen über die Farbe natürlicher Gewässer scheinen damit begonnen zu haben, dass man sich fragte, ob auch reines, von allen fremden Bestandteilen befreites Wasser eine Farbe besitze. Schon Davy[1]) fand eine blaue Eigenfarbe für Wasser; später füllte Bunsen[2]) eine 2 m lange Röhre mit Wasser an, welche bei durchfallendem Lichte ebenfalls eine blaue Farbe erkennen liess. Halleys[3]) Versuch in einer Taucherglocke, bei dem er die Oberfläche seiner Hand rötlich, die Unterfläche grün gefärbt sah, gab Arago[4]) zu der Behauptung Veranlassung, dass das Wasser zwei Farben habe, die des durchgelassenen Lichtes und die des reflektierten. Bei seinen eigenen Untersuchungen in der Natur beobachtete er die Wasserfarbe, indem er ein mit Luft gefülltes Hohlprisma aus Glas so unter Wasser brachte, dass das horizontal unter der Wasserorberfläche hinziehende diffuse Licht von der Hypotenusenfläche total reflektiert wurde. In ähnlicher Weise verwendete Poggendorf[5]) einen unter 45° im Wasser aufgestellten Spiegel.

Durch Bunsens Versuche stand es fest, dass reines Wasser eine blaue Eigenfarbe habe. Es fragte sich nun, woher stammen die Abweichungen vom Blau, das Grün, Gelb und Braun. Durocher[6]) sprach sich dahin aus, dass man es dem Wasser ansehen müsse, woher es kommt: Gletscherwasser müsse blau sein, Moorwasser braun usw. St. Claire-Deville[7]) fand, dass grünes Wasser stets

[1]) Davy, Edinburgh, Journ. 34, p. 88.
[2]) Bunsen, Jahresber. über d. Fortschr. i. d. Chem. 1847—48, p. 1236.
[3]) Beetz, Pogg. Ann. 115, 1862, p. 137.
[4]) Arago, Pogg. Ann. 45, 1838, p. 468.
[5]) Poggendorf, Pogg. Ann. 45, 1838, p. 474.
[6]) Durocher, Compt. rend. 24, 1847, 1, p. 677.
[7]) St. Claire-Deville, Annales de chimie et de phys. III. 23. 1848. p. 32—47.

organische Rückstände gebe, während bei blauem Wasser solche nur in unmerklichen Quantitäten vorkämen. Wittstein[1]) begründete zuerst eine Theorie der Wasserfarbe auf der Annahme, dass der chemische Gehalt allein für die Farbe ausschlaggebend sei. Seine Proben für die chemische Analyse entnahm er verschiedenen bayerischen Gewässern. Dabei kam er zu dem Resultat, dass gelbes und braunes Wasser viel reicher an organischen Substanzen sei als blaues oder grünes. Auch sprach er direkt den Satz aus, dass die verschiedenen Farben von gelöster organischer Materie herrühren. Solche Lösungen werden bewirkt durch Vermittlung kohlensaurer Alkalien. Die Farbe des Wassers hängt also direkt auch vom Reichtum an kohlensaurem Alkali ab. Beetz[2]) wandte sich in seiner Arbeit wieder mehr der physikalischen Seite der Frage zu. Durch oftmalige Reflexion des Lichtstrahls an Glasspiegeln verschaffte er sich im Laboratorium einen langen Lichtweg, um eine möglichst intensive Farbe zu erhalten. Im Tegernsee tauchte er eine an den Enden mit Spiegelglasplatten geschlossene und in der Wand mit einem Loch versehene Blechröhre schief in das Wasser ein. Wenn die obere Glasplatte die richtige Neigung hatte, so reflektierte sie ein wunderschönes Licht von grüner Farbe. Ferner kam Beetz auf den Gedanken, dass ein eingetauchter weisser Gegenstand (Scheibe) die wahre Wasserfarbe erkennen lassen müsse; in klarem Wasser muss dieselbe natürlich tiefer eingetaucht werden als in trübem.

Durch Wittstein und Beetz schien die Frage nach dem Grund und der Art der Wasserfarbe erledigt zu sein; da trat, verursacht durch die Versuche Tyndalls,[3]) ein neuer Gesichtspunkt in die Forschung ein. Man fragte sich, ob nicht die Wasserfarbe als Farbe eines trüben Mediums aufgefasst werden könnte, wodurch schon Leonardo da Vinci und später Newton und Goethe[4]) das Blau des Himmels zu erklären versucht hatten. Tyndall bemühte sich in der Tat zu zeigen, dass das Himmelsblau keine Eigenfarbe sei, sondern durch Diffussion an kleinsten farblosen Teilen entstehe, eine Theorie, die J. W. Strutt[5]) (der spätere Lord Rayleigh) dann tat-

[1]) Wittstein, Sitzungsber. d. K. bayer. Akad. d. Wiss. i. München 1860, p. 603.
[2]) Beetz a. a. O.
[3]) Tyndall, Arch. d. sciences phys. et nat. 33, 1868 und 34, 1869, p. 156.
[4]) Goethe, Farbenlehre, didakt. Teil X, § 145—172.
[5]) J. W. Strutt, Phil. Mag. IV, 1871, 1, p. 274 und Phil. Mag. V. 1899, 47, p. 375.

sächlich mathematisch begründet hat. Tyndall schloss, dass ein Körper, der keine Spur eines fremden Körpers enthält, das Licht hindurchlasse, ohne dass dabei der Lichtstrahl sichtbar wird, d. h. dass er „optisch leer" sei. Die Grösse der seitlichen Erhellung einer Flüssigkeit ist also ein Mass für seine Trübung. Sind nun die Fremdkörperchen sehr klein, sogar klein im Verhältnis zur Lichtwellenlänge, so hat eine mit solchen Teilchen vermischte an sich farblose Flüssigkeit die Eigenschaft, im seitlichen gebeugten Licht bläulich, im durchgelassenen Licht rötlich zu erscheinen. Tyndall nennt den Zustand, in dem solche kleine Körperchen auftreten, einen „angehenden Niederschlag" (aktinische Wolken). Das Licht, das aus einer solchen Flüssigkeit austritt, ist polarisiert, die brechbareren Strahlen werden hauptsächlich reflektiert und haben ihr Polarisationsmaximum senkrecht zum einfallenden Strahl. Soret[1]) kam nun, durch die blaue Farbe des Genfersees aufmerksam gemacht, auf die Idee, dass die Wasserfarbe auch teilweise durch Diffusion an solchen feinsten suspendierten Partikelchen bedingt sein könne. Besonders die von ihm gefundene Polarisation des aus dem Wasser austretenden Lichtes senkrecht zum einfallenden Strahl bestärkte ihn in dieser Ansicht. Zu seinen Versuchen verwendete er ein Rohr, das an dem Ende, wo es ins Wasser getaucht wurde, mit einer Spiegelglasplatte geschlossen war; das „Okular" bestand aus einem Nikol. Hagenbach[2]) bestätigte die Resultate Sorets am Vierwaldstättersee. Neuerdings wird die Ansicht von Soret besonders von Abegg[3]) vertreten. Da kleine schwimmende Teilchen durch farblose Salzlösung gefällt werden können, so muss ein grösserer Salzgehalt die Wasserfarbe verändern, was auch Schleinitz[4]) im Meer beobachtet haben will.

Eine andere Theorie stellte Lallemand[5]) auf, die auch auf der Zerstreuung des Lichtes beruhte. Doch sollte diese Zerstreuung nicht von festen Teilchen ausgehen, sondern von den einzelnen Molekülen der Flüssigkeit selbst (molekulare Zerstreuung). Solche Vorgänge, wie sie Lallemand annimmt, sind aber, wie Soret und

[1]) Soret, Arch. de sciences phys. et nat. 35, 1869, p. 54.
[2]) Hagenbach, Arch. de sciences phys. et nat. 37, 1870, p. 176.
[3]) R. Abegg, Naturw. Rundschau XIII. Jahrg., 1894, Nr. 14.
[4]) Schleinitz, Naturforscher, VII, p. 59.
[5]) Lallemand, Ann. de chim. et phys. IV, 22, 1871, p. 200.

Spring[1]) nachgewiesen haben, in reinen Flüssigkeiten und vollständigen Lösungen nicht möglich.

Die von Soret begründete Diffraktionstheorie[2]) der Wasserfarbe stiess auf mancherlei Widerspruch von den verschiedensten Seiten. Spring,[3]) der die einschlägigen Fragen in neuester Zeit einer besonders sorgfältigen Prüfung unterzog, kam wieder auf den Standpunkt der Beetzschen Auffassung zurück, indem er durch zahlreiche Versuche nachwies, dass das Blau des reinen Wassers eine Eigenfarbe sei. Die anderen Farben rühren nach ihm von fremden Bestandteilen her. Im Gegensatze zu Wittstein glaubt Spring allerdings hier nicht die im gelösten Zustande vorhandenen organischen Substanzen als einzigen Grund der Farbe annehmen zu dürfen, sondern will hier, aber nur bei den Abweichungen vom Blau, die Rayleighsche Theorie mit zur Erklärung herbeigezogen wissen. Zu seinen Versuchen verwendete er sehr lange Röhren aus Glas oder Zinkblech. Mit Recht betont er, dass reines Wasser, falls dessen blaue Farbe im auffallenden Licht teilweise durch Diffusion entstanden wäre, im durchgelassenen Licht einen gelblichen oder rötlichen Ton haben müsste; dies ist aber durchaus nicht der Fall. Ferner machte er darauf aufmerksam, dass der auch in dicken Schichten vollständig farblose Amylalkohol, falls er feinen atmosphärischen Staub enthält, die gewünschte Farbe trüber Medien zeigen müsste. Aber auch hier war das Resultat negativ. Dass die anderen Farben, wie Grün, Gelb und Braun, nach Springs Ansicht als Farben trüber Medien aufgefasst werden können, sucht er folgendermassen zu begründen: durch Einwirkung von Kohlensäure auf Lösungen von Kalk im Wasser werden feine Niederschläge erzeugt, ähnlich den „im Entstehen begriffenen“ Wolken Tyndalls. Man kann nun den Kohlensäuregehalt so regulieren, dass man alle

---

[1]) Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. 1899, p. 174 und 300.

[2]) Ich unterscheide zwei Theorien zur Erklärung der Wasserfarbe: die „Diffraktionstheorie“ und die „Chemische Theorie“. Nach der ersteren soll die Wasserfarbe als die Farbe eines trüben Mediums aufgefasst werden können, während die Vertreter der chemischen Theorie behaupten, dass die verschiedenen Farben ausschliesslich durch die Farben der im Wasser gelösten Substanzen erklärt werden müssen.

[3]) Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. V, 1883, p. 55; XII, 1886, p. 814; XXXI, 1896, p. 94.

verschiedenen Farben erhält vom Blau bis zum Gelb. In den natürlichen Gewässern müsste also immer ein bestimmtes Quantum von freier Kohlensäure vorhanden sein, um mit dem im Wasser gelösten Kalk einen Niederschlag zu erzeugen von der Art, dass durch Diffusion an diesen kleinsten Teilchen gerade die betreffende Farbe entsteht.

Ablehnend gegenüber der Diffraktionstheorie verhält sich Lallemand,[1]) indem er nachwies, dass die Erhellung beleuchteter Flüssigkeiten durch polarisiertes Licht beinahe ausnahmslos in der Polarisationsebene stattfindet und nicht senkrecht dazu, wie dies nach der Diffraktionstheorie sein müsste.

Aus neuester Zeit sind zu erwähnen die Untersuchungen von Schwager[2]) und Reindl.[3]) Beide stehen ganz auf dem Standpunkt der chemischen Theorie.

Aus Vorstehendem ersieht man, dass die scheinbar so einfache Frage nach der Entstehungsursache der Farbe der Seen und Meere selbst heute noch in sehr verschiedener Weise beantwortet wird. Augenscheinlich ist es überhaupt nicht möglich, diese Frage endgültig zu entscheiden, wenn man sich nicht entschliesst, eine wirkliche Analyse der in Rede stehenden Farbennuancen vorzunehmen, d. h. wenn man nicht spektrophotometrisch die prozentuale Zusammensetzung der „Wasserfarbe“ aus den einzelnen Spektralelementen quantitativ feststellt. Wohl kennt man schon lange die spezifische Eigenschaft des Wassers, die roten Strahlen selektiv zu absorbieren. Der erste, welcher wirkliche Messungen über den von Wasser überhaupt absorbierten Lichtanteil anstellte, dürfte Bouguer[4]) gewesen sein. Er fand, dass das Licht beim Passieren einer 115 Pariser Zoll langen mit Meerwasser gefüllten Röhre sich zum direkt auffallenden Licht abschwäche im Verhältnis 5 : 14. Daraus würde sich für den Absorptionskoeffizienten pro Meter Schichtdicke ergeben $A = 0{,}106$. Erst 100 Jahre später treffen wir wieder auf Angaben, die sich auf die relative Zusammensetzung des durch Wasser ge-

[1]) Lallemand, Compt. rend. 69, 1869, 2, p. 189 und 282.

[2]) Schwager, Hydrochemische Untersuchungen oberbayerischer Seen, Geognostische Jahreshefte, X, 1897, p. 50—80.

[3]) Reindl, Die schwarzen Flüsse Südamerikas, Münchener geograph. Studien. XIII, 1903.

[4]) Bougueri, Optice, Vienne 1762, p. 30.

gangenen Lichtes beziehen. Pater Secchi[1]) reichte der Pariser Akademie im Jahre 1867 eine Mitteilung ein, in der er zeigte, dass im Spektrum des Meerwassers schon in dünnen Schichten das Rot fehle, zum Teil auch das Gelb und Grün. Schönn[2]) konstatierte wohl als erster zwei Absorptionsstreifen im Spektrum des reinen Wassers, einen schwachen in der Nähe der Frauenhoferschen Linie *C*, zwischen 670 und 660 μμ gelegen, und ein deutliches breites Band im Orange zwischen 620 und 610 μμ. J. L. Soret[3]) gibt an, dass Wasser für ultraviolette Strahlen sehr durchlässig sei. Im Jahre 1881 mass Boas[4]) durch Vergleichung des durch vorgeschaltete Gläser oder selektiv absorbierende Lösungen gefärbten Lichtes mit dem durch eine Wassersäule hindurchgegangenen einige Absorptionskoeffizienten (A). Er erhielt

rot	gelb	blau
$A = 0{,}3405$	0,2549	0,1463.

Gibt man dem roten Lichte eine Wellenlänge von $\lambda = 67$ (Abkürzung für 670 μμ), dem gelben von 59, dem blauen von 47, so soll die Beziehung stattfinden:

$$A = 0{,}0001\ (0{,}825\lambda^2 + 3{,}05\lambda - 503).$$

Dass diese Formel nicht zutrifft, wird weiter unten gezeigt werden.

Hüfner und Albrecht[5]) stellten die ersten genaueren Beobachtungen über die Grösse der Absorption des Wassers an. Sie füllten eine 2 m lange Glasröhre mit destilliertem Wasser und verglichen die Intensität des durchgelassenen Lichtes mit der des auffallenden für verschiedene Spektralbereiche. Da aber das durch eine Wassersäule von 2 m Länge hindurchgegangene Licht nur wenig gefärbt ist und da die Angaben der Absorptionskoeffizenten sich nur auf ausgedehntere Gruppen von Lichtwellenlängen beziehen, so kommen hier die charakteristischen Eigentümlichkeiten der Absorption des Wassers noch nicht deutlich zum Ausdruck.

Eine andere Methode, wenigstens einen ungefähren quantitativen Anhalt über die Wasserfarbe zu erhalten, ohne auf die spektral-

[1]) Secchi, Naturforscher, 1868, p. 149.
[2]) Schönn, Pogg. Ann., Erg.-Bd. VIII, 1878, p. 670.
[3]) J. L. Soret, Fortschr. d. Phys., 1877, 33, p. 479.
[4]) Boas, Beiträge zur Erkenntnis der Farbe des Wassers. Kiel, 1881.
[5]) Hüfner und Albrecht, Wied. Ann., 42, p. 1—17, 1891.

analytische Untersuchung zurückzugehen, beruht auf der Vergleichung der natürlichen Gewässerfarben mit sogen. Farbenskalen. Durch Mischung verschieden gefärbter Lösungen sucht man hierbei die Farbe des betreffenden Sees nachzuahmen. Eine solche Skala ist zuerst von Forel angefertigt worden.[1]) Er benützte Lösungen von ammoniakalischem Kupfersulfat und von Kaliumchromat. Durch verschiedene Mischungsverhältnisse dieser beiden Substanzen erhielt er elf Abstufungen vom reinsten Blau bis zum Gelbgrün. Die einzelnen Farbenzusammensetzungen wurden mit römischen Ziffern von I—XI bezeichnet. Durch Angabe einer dieser Zahlen ist also eine ganz bestimmte Farbennuance bestimmt. Ule[2]) erweiterte die Skala, indem er den blauen und grünen Tönen noch braune hinzufügte. Durch Mischung einer Lösung von stark ammoniakalischem Kobaltsulfat mit dem Grün XI der Forelschen Skala erhielt er noch weitere zehn Farben, so dass also die ganze Skala nun aus 21 Farbenstufen besteht, die, allmählich ineinander übergehend, alle möglichen in der Natur vorkommenden Wasserfarben darstellen sollen.

Später hat Ule[3]) eine Skala nach einem andern Prinzip angefertigt, wodurch er eine noch grössere Mannigfaltigkeit der Farben, besonders auch ihrer Intensität nach, erzielte. Als Färbeflüssigkeiten verwendete er Methylenblau, Kaliumchromat und Kaliumdichromat und zwar in folgenden Konzentrationen:

Blau	0,005 g	in	100 ccm	Wasser,
Gelb	0,25 „	„	100 „	„
Braun . . .	5,0 „	„	100 „	„

Diese Flüssigkeiten wurden in keilförmig geformte Gefässe eingeschlossen, die gegeneinander verschiebbar waren. Die ganze Vorrichtung befand sich in einem nach beiden Seiten offenen Kasten. Oben und unten waren kleine Öffnungen angebracht, so dass man etwa einen 0,5 cm breiten Streifen von den Farbenkeilen ausblenden konnte. Die einzelnen Gefässe waren durch Marken in je 10 Teile abgeteilt. Es liess sich also eine bestimmte Farbe in verschiedener Schichtstärke einstellen.

[1]) Forel, Le Léman, 2. Bd., p. 462—487, 1895.

[2]) Ule, Die Bestimmung der Wasserfarbe in den Seen; Petermanns Mitteilungen, 1892.

[3]) Ule, Der Würmsee, p. 160, 1901.

Die Farbe eines Sees oder Gewässers suchte man vielfach auch dadurch zu erklären, dass man sagte, die Farbe rühre überhaupt nicht allein vom Wasser her, sondern, was man sehe, sei die Färbung des Seegrundes,[1]) der je nach der Tiefe des Sees heller oder dunkler erscheine. Auch der Reflex vom Himmel[2]) oder von der nächsten Umgebung[3]) soll die Wasserfarbe beeinflussen; auch die Temperatur[4]) und damit die verschiedene Dichtigkeit des Wassers, die im See befindlichen Pflanzen[5]) usw. werden zur Erklärung mit herbeigezogen. Ausserdem führt Spring[6]) noch als Grund der verschiedenen Färbung das Webersche psychophysische Grundgesetz an. Er bemerkt dazu, dass die Empfindung einer Farbe verlischt oder sich abschwächt, wenn das Auge durch die Wahrnehmung anderer Farben oder durch starke äussere Reize beansprucht ist. Daher wird die Farbe eines Sees bei vollem Sonnenschein weniger lebhaft sein als bei trübem Himmel. Dazu gesellt sich aber noch die Wirkung infolge grösserer oder geringerer Durchsichtigkeit des Wassers. Die maximale Farbenempfindung ist also scharf gebunden an die Stärke der Beleuchtung und an die dabei auftretende Reizung der Augen.

Überblicken wir die im Vorstehenden angegebene Litteratur, so fällt es auf, dass Messungen, wenn überhaupt, so meist nur im Laboratorium ausgeführt worden sind. Wenn auch einige Forscher ihre Beobachtungen in der Natur auf einem See vorgenommen haben, so fehlen doch quantitative Untersuchungen über die Lichtabsorption des Wassers in der Natur selbst vollständig. Durch solche ist es aber allein möglich, sich darüber Rechenschaft zu geben, in welcher Weise die verschiedenen Faktoren, wie Beleuchtung, Trübung des Wassers, Temperaturveränderung voneinander abhängen und welchen Einfluss sie auf die Farbe ausüben.

Diese Lücken auszufüllen, ist der Zweck meiner Arbeit. Zwei Reihen von Untersuchungen mussten angestellt werden, um die Frage zu klären, nämlich solche im Laboratorium, und zweitens solche in

[1]) Wallmann, Jahrbuch des österr. Alpenvereins, IV, 1868.
[2]) Schwager a. a. O.
[3]) Wallmann a. a. O.
[4]) Ebenda und Boguslawsky, Handb. der Ozeonographie, I. Bd., 1884.
[5]) Brun, Jahresber. über Chem., 1880, p. 1512.
[6]) Spring, Bull. Acad. Roy. Belg., 1886, p. 814.

der Natur selbst. Bei ersteren ging ich vom vollkommen reinen, optisch leeren Wasser aus und dehnte dann meine Untersuchungen auf Mischungen des reinen Wassers mit chemischen Substanzen und auf künstlich getrübtes Wasser aus. Die Beobachtungen in der Natur erstrecken sich auf Messungen über die Lichtabsorption des Wassers verschiedener Seen. Hierbei wurde die Intensität des aus dem Wasser austretenden Lichtes verglichen mit der des direkten Himmelslichtes. Die Lichtquelle ist also für beide Lichtarten, nämlich für das Vergleichslicht und für das aus dem Wasser austretende Licht, die gleiche. Bei diesen Messungen zeigte es sich, dass auch Beobachtungen über die Durchsichtigkeit, die Temperatur und die Polarisationsverhältnisse des aus dem Wasser kommenden Lichtes notwendig waren.

Um an diesem Orte alle historischen Bemerkungen zu erledigen, gehe ich daher auch kurz noch auf die bisher ausgeführten Durchsichtigkeits- und Temperaturmessungen ein.

Soviel ich weiss, hat man zur Messung der Durchsichtigkeit des See- oder Meerwassers seither drei verschiedene Methoden angewandt. Durch Versenkung einer Lichtquelle (elektrische Lampe) bei Nacht suchte Soret[1]) im Genfersee die Sichttiefe festzustellen. Durch Einbringen von photographischen Platten in verschiedene Seetiefen lässt sich ferner das Eindringen von Licht ins Wasser überhaupt bestimmen. Forel[2]) betrat zuerst diesen Weg. Fol und Sarasin[3]) konstruierten sich einen eigenen Apparat, der sich bei der gewünschten Tiefe selbsttätig öffnete und schloss. Sie fanden, dass im Genfersee eine Platte nach einer Exposition von 10 Minuten in 170 m Tiefe bei bewölktem Himmel noch belichtet war. Ähnliche Versuche machte Asper[4]) am Züricher See. Später haben Chun und Petersen[5]) diese Methoden verbessert. Der neueste Apparat in dieser Beziehung rührt von Ule[6]) her und soll sehr zuverlässig sein. Am einfachsten aber ist es, durch Versenken eines leicht sichtbaren Gegenstandes ein Mass für die Durchsichtigkeit des Wassers

[1]) Soret, Arch. de sciences phys. et nat., XII, Août 1884.
[2]) Forel, Transparenz und Farbe des Bodensees, Lindau 1893.
[3]) Fol und Sarasin, Compt. rend., 1884, p. 1—4.
[4]) Asper bei Fol und Sarasin, Compt. rend., 1884, p. 1—4.
[5]) Chun und Petersen, Zoologische Abhandlungen, Bd. I. Cassel 1887, p. 58.
[6]) Ule, Der Würmsee, p. 176.

sich zu schaffen. Als erster dürfte Kotzebue[1]) solche Sichttiefenmessungen ausgeführt haben. Er versenkte im stillen Ozean ein rotes Tuch, später einen weissen Teller und bestimmte die Tiefen, bis zu welchen diese Gegenstände sichtbar blieben. Seitdem wurden ähnliche Messungen oft wiederholt, so besonders von Krümmel.[2]) Am meisten verwendete man weisse Scheiben, jedoch sind nur immer einzelne Beobachtungen angegeben, wie solche gelegentlich einer Seereise oder während des Aufenthalts an einem Binnensee gemacht wurden. Eine wirkliche Messungsreihe, wodurch die Veränderung der Sichttiefe mit der Jahreszeit festgelegt werden konnte, hat zuerst Ule[3]) am Starnberger- (Würm-) See ausgeführt.

Die Temperaturverhältnisse in einem See, die jährlichen Schwankungen der Wärme nach der Tiefe zu, können schon als ziemlich vollkommen erforscht gelten. Durch Richter[4]) sind in vielen österreichischen Seen eingehende Forschungen angestellt worden; Forel[5]) hat dann alle bis dahin bekannten Resultate systematisch zusammengestellt und auch Ule hat in seinem „Würmsee" sehr wertvolle Beiträge gegeben. Wenn ich hier die Hauptergebnisse dieser Forschungen anführe, so geschieht dies deshalb, damit ich mich später bei Angabe meiner eigenen Resultate kürzer fassen kann. Als solche Haupttatsachen gibt Richter auf S. 69 an:

1. Der Moment, wo ein See seiner ganzen Tiefe nach gerade auf $+4^0$ C sich abgekühlt hat, ist noch nie beobachtet worden. Die Temperatur steht meist über oder unter 4^0.
2. Bei der Abkühlung verschwinden Temperaturen von 4^0 sehr rasch, weil das kältere, leichtere Wasser in die Höhe steigt.
3. Dasselbe tritt ein bei der Erwärmung im März und April.
4. Je weniger sich gegen den Sommer hin die Oberfläche nächtlich abkühlt, desto weniger tief greifen die Konvektionsströme, und umsomehr grenzt sich die warme Oberflächenschicht gegen unten ab. Es entsteht die Sprungschicht, und die darunter liegenden Schichten erwärmen sich im weiteren Verlauf des Sommers nur mehr sehr wenig.

[1]) Krümmel, Ann. d. Hydr. u. marit. Met., 17. Jahrg., 1889, Heft 2, p. 62—78.
[2]) Ebenda.
[3]) Ule, Der Würmsee, p. 162.
[4]) E. Richter, Seestud., Geogr. Abhandl. Bd. VI, Heft 2. Wien 1897.
[5]) Forel, Le Léman, Bd. II, p. 289, 1895.

5. und 6. Die warme Oberflächenschicht wird während des Sommers immer mächtiger, die Erwärmung wird ausschliesslich durch die Sonnenstrahlen bewirkt und ist von der Lufttemperatur fast unabhängig.
7. Der Grad der Reinheit des Wassers bedingt hier grosse Unterschiede. Bei nicht ganz klaren Seen bringt die Sonnenstrahlung im Verlauf des ganzen Sommers in Tiefen von 10 bis 12 m nur eine Erwärmung von 1 oder 2^0 hervor.
8. Mit dem ersten starken Wetterumschlag im September beginnt die Abkühlungsperiode, die auch durch lange andauerndes schönes Herbstwetter nicht mehr in ihr Gegenteil verkehrt werden kann.
9. Jetzt wächst die gleich temperierte Schicht rasch nach unten an Mächtigkeit, während ihre Temperatur gleichmässig langsam abnimmt. Im November verschwindet die Sprungschicht gänzlich.
10. Bevor noch die ganze Wassermasse auf 4^0 abgekühlt ist, beginnt schon die umgekehrte Wärmeschichtung.
11. Grosse und tiefe Seen frieren schwer, weil die Abkühlung der tieferen Wassermassen bis gegen 4^0 und der oberen 40—100 m unter 4^0, die zum Frieren nötig ist, bis Anfang Februar meist noch nicht zustande gekommen ist; ferner auch deshalb, weil sie stark bewegt sind.
12. Das Frieren der Seen tritt ein, wenn die Oberfläche auf $+1^0$ oder 2^0 abgekühlt ist. Wassertemperaturen von 0^0 vor dem Zufrieren wurden noch niemals beobachtet.

Ferner führen Richter und Ule an, dass die Flächen gleicher Temperatur in einem See keine Ebenen sind, sondern wellig das ganze Becken durchziehen.

I. Abschnitt.

Apparate und Methoden.

1. Spektrophotometer.

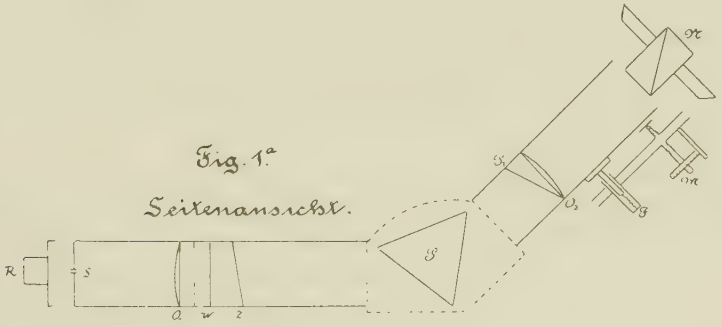
Dieses Instrument, eine nach Angabe von F. F. Martens[1]) angefertigte Neukonstruktion des von A. König[2]) erfundenen Spektrophotometers stammt von der Firma Schmidt & Hänsch in Berlin. Gegenüber anderen Konstruktionen zeichnet sich der Apparat besonders dadurch aus, dass die Anordnung von Kollimator- und Okularrohr in einer Vertikalebene, nicht in einer Horizontalebene getroffen ist. Dies ist von wesentlichem Vorteil, da sich die Beobachtung auf diese Weise viel bequemer gestaltet. Der Teilkreis am Nikolschen Prisma ist nur in ganze Grade geteilt, wobei die Zehntel mit Hilfe einer Lupe noch gut geschätzt werden können. Eine grössere Genauigkeit in der Einstellung ist nicht möglich, daher genügt diese Teilung vollständig. Die Martenssche Neukonstruktion hat ferner noch eine Vorrichtung zur Spaltbeleuchtung vorgesehen. Das von einer passend abgeblendeten Lichtquelle ausgehende Strahlenbündel wird durch zwei neben einander befindliche Linsen von gleicher Brennweite in zwei Teile geteilt, so dass in beide Spalten Licht von derselben Art und demselben Zustand gelangt, was bei spektrophotometrischen Messungen von grosser Wichtigkeit ist.

In optischer Beziehung bezwecken die in der Neukonstruktion enthaltenen Verbesserungen hauptsächlich die Entfernung der an den Glasflächen im Innern des Apparates entstehenden störenden Reflexionen. Fig. 1a und 1b geben eine schematische Ansicht des Apparates. Man sieht, dass das aus Kalkspat geschliffene Wollastonsche Prisma W direkt an das Kollimatorobjektiv O_1, eine plan-

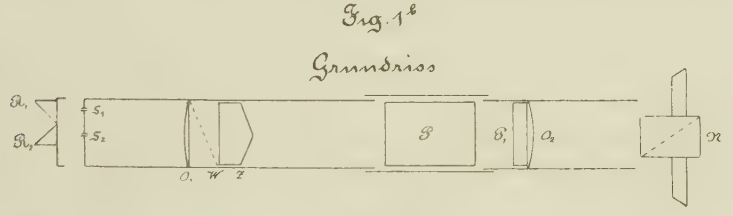
[1]) F. F. Martens, Verhandl. d. Deutsch. phys. Gesell., 1899, p. 278 und 280.
[2]) A. König, Wiedem. Ann. 53, 1894, p. 785.

konvexe Linse, angekittet ist. An dieses wieder schliesst sich direkt das Zwillingsprisma Z an, welcher eine Ablenkung von reflektierten Strahlen nach der Seite hin bewirkt. Aus dem gleichen Grunde ist auch am Objektiv O_2 des Beobachtungsfernrohres ein Prisma P_1 mit schräger Kante angebracht.

Wie bei der älteren Königschen Ausführung tritt das Licht durch die beiden Spalte S_1 und S_2 ein. Die dort entworfenen



Bilder zerlegt das Wollastonsche Prisma in zwei senkrecht zu einander polarisierte, das Zwillingsprisma jedes derselben noch einmal, wobei jedoch an der Polarisation nichts mehr geändert wird.



Der Winkel des Zwillingsprismas ist so gewählt, dass in der Bildebene des Beobachtungsfernrohres, nachdem das Licht durch das Prisma P und das Objektiv O_2 gegangen ist, zwei senkrecht zu einander polarisierte Spaltbilder übereinander fallen. Das eine kommt von S_1, das andere von S_2. Durch einen dort angebrachten Spalt kann man das ankommende Licht beliebig abblenden. Man hat nun zwei zu einem vollen Kreis sich ergänzende erleuchtete Halbkreisflächen. Die rechte erhält ihr Licht durch den linken Spalt S_2, die linke durch den Spalt S_1. Beide sind senkrecht zueinander polarisiert.

Man kann daher durch Drehen des Nikols N beide Hälften auf gleiche Helligkeit bringen.

Durch Drehen an der Mikrometerschraube M, deren Umfang in 100 Teile geteilt ist, kann man nach Aichung des Apparates auf die gewünschte Wellenlänge einstellen. Durch eine starke Feder F ist der Schraube die Hauptlast des darauf liegenden Rohres abgenommen.

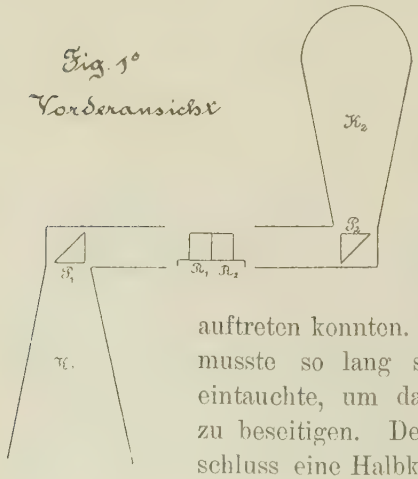
Will man seitlich vom Apparat befindliche Lichtquellen miteinander vergleichen, so kann man auf das Kollimatorrohr zwei total reflektierende Prismen in geeigneter Fassung aufsetzen.

Das Photometer wurde von mir in dreierlei verschiedenen Ausrüstungsformen verwendet:

a) Mit der anfangs beschriebenen Spaltbeleuchtungsvorrichtung gebrauchte ich es zur Bestimmung der Absorption von Farblösungen, die zum Vergleich mit der Wasserfarbe gedient haben, ferner zur Feststellung der Nulllagen und zur Aichung des Apparates.

b) Bei den Beobachtungen im Laboratorium kamen die Lichtstrahlen von der Seite, deshalb benützte ich hier die Fassung mit den beiden Prismen.

c) Bei den Messungen auf den Seen kam das eine Licht (Wasserfarbe) von unten, das Vergleichslicht (Himmelslicht) von oben, daher wurden (Fig. 1c) seitlich von R_1 und R_2 noch zwei total reflektierende Prismen P_1 und P_2 in geschwärztem Messinggehäuse angebracht, welche durch je einen Konus K das entsprechende Licht erhielten. Dieser Hohlkegel war so konstruiert, dass die Spitze der nach hinten verlängerten Mantelfläche auf die Spalte S_1 und S_2 traf. Dabei war die Öffnung des Kegels etwas grösser als die der Strahlenkegel im Photometer, damit keine Wandreflexe auftreten konnten. Der zum See gerichtete Trichter musste so lang sein, dass er eben ins Wasser eintauchte, um dadurch die Oberflächenspiegelung zu beseitigen. Der andere erhielt als oberen Abschluss eine Halbkugel aus Mattglas. Die von dieser



in den Apparat gelangende Helligkeit stellte dann die Summe für alle einzelnen Partien am Himmelsgewölbe dar.

Werden die beiden Spalte S_1 und S_2 von zwei gleich starken Lichtquellen beleuchtet, so haben wir das Nikol N gegen die Nullstellung um einen gewissen Winkel φ (siehe Fig. 2) zu drehen. Dieser Stellung entspreche der Punkt a auf dem Teilkreis. Dabei ist $\varphi = 45^0$. Kommt Licht von verschiedener Helligkeit J_1 und J_2, so erhält die eine Hälfte des Okulargesichtsfeldes die Intensität $J_1 \sin^2\alpha$, die andere $J_2 \cos^2\alpha$. Stellt man durch Drehen des Nikols wieder auf gleiche Helligkeit ein, so wird $J_1 \sin^2\alpha = J_2 \cos^2\alpha$, oder $\frac{J_1}{J_2} = \operatorname{ctg}^2\alpha$.

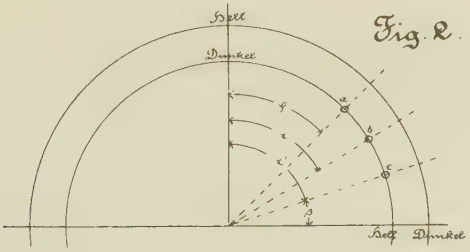


Fig. 2.

Der äußere Kreis bedeutet den Zustand des Vergleichslichts, der innere den des Lichtes, das aus dem Wasser kommt.

Diese Stellung entspreche der Stellung b in Fig. 2. Der Drehungswinkel sei α, von der Dunkelheitsstelle desjenigen Bildes aus gerechnet, welches das Licht von der Intensität J_1 erhält. Wird J_1 ferner noch durch ein vorgeschaltetes absorbierendes Mittel geändert, so kommt Licht von den Intensitäten $i = aJ_1$ $(a < 1)$ und J_2 in den Apparat, und es ist $\frac{aJ_1}{J_2} = \operatorname{ctg}^2\alpha'$, wenn α' den neuen Winkel bedeutet. Dabei ist $\alpha' > \alpha$; der Einstellung auf gleiche Helligkeit entspreche die Stelle c. Es ergibt sich also

$$a = \frac{\operatorname{ctg}^2\alpha'}{\operatorname{ctg}^2\alpha} \qquad 1.$$

Nun ist aber unter Einführung des Absorptionskoeffizienten A

$$i = aJ = e^{-Ad} \times J, \text{ also}$$

$$a = e^{-Ad} \qquad 2.$$

und aus 1. und 2.

$$A = -\frac{\overset{e}{\log}\frac{\operatorname{ctg}^2\alpha}{\operatorname{ctg}^2\alpha}}{d} = \frac{\overset{e}{\log}\frac{\operatorname{ctg}^2\alpha}{\operatorname{ctg}^2\alpha'}}{d} = \frac{\overset{10}{\log}\frac{\operatorname{ctg}^2\alpha}{\operatorname{ctg}^2\alpha'}}{d\log e}. \qquad 3.$$

Diese Formel wurde verwendet zur Berechnung der Absorptionskoeffizienten sämtlicher Gewässer. Bei der Anordnung, bei welcher die Martens'sche Spaltbeleuchtungsvorrichtung gebraucht werden kann, also bei den Farbstoffen, vereinfacht sich die Formel etwas; da nämlich $\sphericalangle \alpha$ für alle Farben $= 45^0$ ist, so wird $\operatorname{ctg}\alpha = 1$; verwendet man schliesslich statt des $\sphericalangle \alpha$ den $\sphericalangle \beta$ (Fig. 2), so lautet die Formel

$$A = \frac{1}{d}\frac{\operatorname{Log}\operatorname{ctg}^2\beta}{\operatorname{Log} e}. \qquad 4.$$

Der Absorptionskoeffizient A bedeutet hier den reziproken Wert derjenigen Schichtdicke d, bei welcher die Intensität des einfallenden Lichtes auf $1/e$ gesunken ist.

Der Absorptionskoeffizient konnte gemäss der Lichtstärke des Photometers auf den Seen innerhalb des Spektralbereiches von 650 und 470 $\mu\mu$ gemessen werden. Bei künstlicher Beleuchtung konnte man im Rot bis 660 $\mu\mu$ gelangen. Die erhaltenen Werte wurden graphisch aufgetragen in der Weise, dass die Abszissen die Lichtwellenlängen angeben, die Ordinaten die Grösse von A. Aus einer solchen Kurve kann man also die Stärke der Absorption für jede Stelle des Spektrums ersehen.

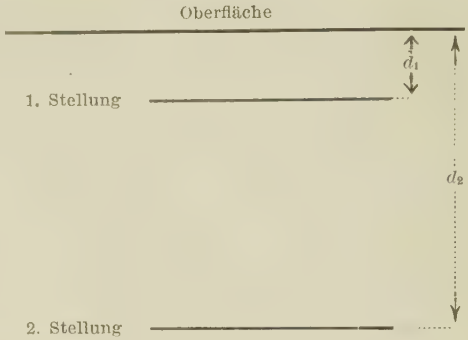
Was die Genauigkeit der Messung betrifft, so erhielt ich folgende Resultate: Die Absorptionskoeffizienten im roten Teil des Spektrums können Differenzen von 1% aufweisen, die im Gelb und Grün solche von 0,8%, während im Blau und Violett wegen der grösseren Schwierigkeit, in den dunklen Partien auf gleiche Helligkeit einzustellen, Fehler bis zu 2% vorkommen können. Diese Grössen wurden aus den mittleren Fehlern der Einstellungen am Nikol gerechnet.

Die Vorbedingungen, um auf dem See eine brauchbare Messungsreihe mit dem Photometer ausführen zu können, sind zahlreich. Vor allem muss man ein geräumiges, stabiles Boot haben; am besten eignen sich hierzu die grossen Kähne mit breitem Boden, wie sie an vielen unserer bayerischen Seen angetroffen werden. Kielschiffe sind gänzlich unbrauchbar. Die Beleuchtung muss während der Messung gleichmässig sein, man braucht also entweder wolkenlosen

oder ganz bedeckten Himmel. In letzterem Falle ist aber der Apparat meist zu lichtschwach. Teilweise wechselnde Bewölkung ist schädlich wegen der stets sich ändernden Menge an polarisiertem Himmelslicht. Ich musste daher immer auf wolkenlose Tage warten. Das Boot liess ich durch einen Gehilfen stets so einstellen, dass der Apparat direkt gegen die Sonne gerichtet war, dann war die Beleuchtung der Scheibe im Wasser am intensivsten und eine Beschattung durch das Schiff ausgeschlossen. Diese Stellung musste der Gehilfe während der Messung genau einhalten. Eine weitere wesentliche Vorbedingung ist die, dass der See vollkommen glatt ist, weil schon durch die kleinsten Wellen ein Flimmern auf der Scheibe eintritt, wodurch eine genauere Messung unmöglich wird. Messungen im Schatten, auch bei wolkenlosem Himmel, sind zu vermeiden. Die Temperatur der benutzten Wasserschicht soll möglichst konstant sein, da sonst Schlieren auftreten können. Die geeignetsten Zeiten sind daher der Winter oder der Hochsommer. Berücksichtigt man alles dies, so wird bei einer gegebenen Sichttiefe die Absorptionskurve für jede zur Messung noch geeignete Tiefenlage der Scheibe, bezogen auf die Schichtdicke von 1 m, gleich gefunden werden. Man erkennt hieraus, dass es oft langen Hinwartens bedurfte, bis die Bedingungen zu brauchbaren Messungen eingetreten waren. So war es mir z. B. am Walchensee erst nach vier Wochen möglich, eine allen Anforderungen genügende Kurve zu erhalten.

Wenn alle Vorbedingungen, unter denen eine genaue Beobachtung möglich ist, erfüllt waren, wurde der Apparat horizontal auf eine Bank des Schiffes gestellt, so dass das Rohr K_1 (Fig. 1 *c*) ins Wasser eintauchen konnte. In dieser Lage wurde er festgebunden. Eine weisse Scheibe (s. u.) wurde senkrecht darunter, zuerst möglichst wenig, unter Wasser gebracht, jedoch so tief, dass kein Schatten vom Apparat auf sie fiel. So konnte $\sphericalangle \alpha$ bestimmt werden. Abgelesen wurde am Teilkreis in zwei um 180^0 voneinander verschiedenen Lagen, in jeder Lage zwei Beobachtungen, so dass jeder Winkelwert das Mittel aus vier Ablesungen ist. Am Schluss wurde wieder die zuerst bestimmte Wellenlänge eingestellt, um zu konstatieren, dass sich nichts geändert habe. Bei den Ablesungen deckte der Beobachter, um die Augen gegen die umgebende Helligkeit zu schützen, ein schwarzes Tuch über den Kopf. Hierauf wurde die Scheibe tiefer hinunter gelassen, je nach der Durchsichtigkeit des

Sees. Die Beobachtung gestaltete sich in derselben Weise. Stets musste darauf geachtet werden, dass die Scheibe immer noch das ganze Gesichtsfeld des Rohres K_1 erfüllte. Nach Beendigung jeder Messung wurde die Tiefe der Scheibe an der Aufhängeleine gemessen. Da das Licht vom Himmel, bis es in den Apparat gelangt, den Weg durch das Wasser zweimal durchmisst, so war die in Formel 3 auftretende Grösse $d = 2\,(d_2 - d_1)$. Eine die Wasserfarbe etwa beeinträchtigende Eigenfarbe der Scheibe, sowie deren lichtreflektierende Kraft, ihre sog. „Albedo", fällt bei dieser Art der Beobachtung heraus.



Da die ziemlich lange Zeit in Anspruch nehmende Messungsreihe die Augen sehr ermüdet, so benützte ich, um das eine Auge nicht immer schliessen zu müssen, eine eigens konstruierte Brille, von der Art, wie solche bei den Augenärzten zur Prüfung der Sehschärfe in Gebrauch sind (sogenannte Probierbrille). Hierbei ist die Öffnung für das beobachtende Auge freigelassen, die für das andere durch eine Mattglasscheibe geschlossen.

2. Weisse Scheibe.

Zur Bestimmung der Sichttiefe und zur Abgrenzung einer Wasserschicht von beliebiger Dicke d (s. Formel 3) versenkte ich eine weisse kreisförmige Scheibe in den See. Sie bestand aus dickem Zinkblech und war mit einem dreifachen stark glänzenden Anstrich von weissem Emaillack versehen. Ihr Durchmesser betrug 1 m; diese Grösse war erforderlich, um bei bedeutenderen Sichttiefen noch ein deutlich wahrnehmbares Objekt zu haben. Andererseits ist aber eine noch grössere Scheibe nicht mehr handlich. In das Seil, an welchem sie befestigt war, waren von Meter zu Meter Marken eingeknüpft. Am Rand des Bootes war eine Rolle angebracht, über welche das Seil gleiten konnte. Was die Grösse der Scheibe betrifft, so ist es ja zwar nicht ganz leicht, besonders in bedeutenden Tiefen, mit ihr zu operieren. Aber es wäre doch für weitere Sichttiefenmessungen

sehr wünschenswert, wenn der Durchmesser von 1 m als Normalmass beibehalten würde. Denn, je grösser eine Fläche ist, umso länger kann sie noch als solche erkannt werden. Helmholtz[1]) gibt an, dass die Felder eines Schachbrettes unter einem Sehwinkel von 124″ noch unterschieden werden können. Es dürfte also der Sehwinkel von 2′ das Mindestmass sein für die Erkennbarkeit einer Fläche. Nun habe ich mit meiner Scheibe als grösste Sichttiefe 25 m gefunden (im Meer sollen noch grössere vorkommen). Die Scheibe erscheint dann unter einem Winkel von 2° 18′, also immer noch als ziemlich grosse Fläche. Eine Scheibe von 30 cm Durchmesser (eine Grösse, die vielfach im Gebrauch war) würde in derselben Tiefe nur mehr unter 20′ gesehen werden. Es ist nun klar, dass ein solch' kleines Scheibchen, da es ja durch die darüber liegende Wasserschicht auch noch stark gefärbt ist, selbst im durchsichtigsten See in grösseren Tiefen nicht mehr von der Umgebung unterschieden werden kann. Bei geringen Sichttiefen, solchen von 6 bis 10 m, sieht man natürlich auch kleine Scheiben noch unter grossem Winkel, man wird also hier auch bei Verwendung von kleinen Scheiben dieselben Zahlen bekommen, wie mit grossen Scheiben. Bei grossen Sichttiefen jedoch werden kleine Scheiben zu kleine Werte ergeben, wodurch ein Vergleich der Klarheit des Wassers verschiedener Seen zu Ungunsten der klareren ausfallen wird.

Die Messung der Sichttiefe konnte, wie später ausgeführt wird, bei jeder Witterung und Beleuchtung vorgenommen werden, doch durfte der See auch hier nicht sehr bewegt sein wegen des sonst unvermeidlichen Treibens des Schiffes, wobei natürlich die Scheibe stets zurückblieb. Da die Scheibe infolge ihrer Grösse sehr schwankte, so musste das Hinablassen langsam geschehen. Während der Gehilfe dies besorgte, verfolgte ich sie mit einem ins Wasser eingetauchten grossen Sehrohr (siehe unten), bis sie verschwunden war; dann wurde sie emporgezogen, bis sie wieder erschien und aus beiden Tiefen das Mittel genommen. Bei einiger Übung sind Fehler von 0,5 m das Maximum.

3. Sehrohr.

Zu einer zuverlässigen Bestimmung der Sichttiefen und um die Eigenfarbe eines Sees unabhängig von den Einflüssen der Umgebung

[1]) Helmholtz, phys. Opt., 2. Aufl., p. 259.

erkennen zu können, war es notwendig, den Reflex der Oberfläche zu eliminieren. Ich bediente mich hiezu eines geschwärzten Rohres aus Zinkblech, das in Form eines Sprachrohres nach vorn sich erweiterte. Die Länge betrug 1 m, die engere Öffnung hatte einen Durchmesser von 4 cm, die weite einen solchen von 25 cm. Nach Arago kann man Gegenstände im Wasser auch deutlich sichtbar machen, wenn man mit Hilfe einer polarisierenden Turmalinplatte die Oberflächenreflexion beseitigt.[1])

4. Thermometer.

Die Messung der Temperatur geschah mit einem Minimumthermometer, demselben, das schon Geistbeck[2]) benützt hatte. Es stammt von der Firma Kappeller in Wien. Das Instrument befindet sich in einer starken Messinghülse, die auf der Seite der Skala offen ist. Diese Öffnung ist mit einem weitmaschigen Drahtgeflecht überzogen. Das Ganze ruht in einer massiven Eisenfassung, an der einerseits die Messschnur, andererseits ein gestricktes Netz zur Aufnahme der Belastung (Steine) befestigt ist. Die Skala des Thermometers ist in Fünftelgrade geteilt. Vor der Benützung wurde das Instrument neu geaicht.

Durch Beobachtung an der Oberfläche ergab sich, dass die Einstellung für kleine Temperaturintervalle in einer Minute beendet ist. In geringen Tiefen genügte also als Dauer der Einstellung eine Zeit von 2 bis 3 Minuten. Bei grösseren Intervallen und in grösseren Tiefen liess ich das Thermometer 4—5 Minuten ausgesetzt. Die Leine war wie die der Scheibe in Meter eingeteilt.

Da an einem gegebenen Tage die Flächen gleicher Temperatur keine Horizontalebenen sind,[3]) (ganz abgesehen von stark beschatteten Partien des Sees), sondern wellenförmig das Seebecken durchziehen, und infolgedessen die Temperaturen an Stellen gleicher Tiefe um mehrere Zehntel Grade von einander abweichen können, so genügt vollkommen eine Angabe nach Zehntel-, eigentlich schon nach Fünftel- oder Viertelgraden. Man erhält so sehr schön und für alle Zwecke entsprechend die Verteilung der Temperatur der Tiefe nach.

[1]) Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik 2[1], 9. Aufl., p. 989.

[2]) Geistbeck, Die Seen der deutschen Alpen, 1885, p. 36.

[3]) Vgl. auch Dr. Ed. Richter, Seestud., p. 68.

Um auch auf andere Weise Temperaturmessungen zu versuchen, verfertigte ich mir ein von Knudsen[1]) angegebenes elektrisches Tiefseethermometer. Für meine Zwecke gab ich jedoch dem erst-erwähnten den Vorzug, da es sich schnell einstellt und bei den verhältnismässig geringen Tiefen (bis zu 40 m) das jedesmalige Heraufziehen nicht zu viel Zeit beansprucht. Auch hat es dem elektrischen gegenüber den Vorzug grösserer Leichtigkeit beim Transport.

5. Zinkröhre.

Um im Laboratorium Wasser auf seine Farbe zu untersuchen, kann man eine Röhre entweder vertikal oder horizontal aufstellen. Das erstere würde den Verhältnissen in der Natur am meisten entsprechen. Ich habe zuerst eine vertikale Röhre von 2 m Höhe probiert. Am Boden war ein Spiegel angebracht, der, an Messingkettchen befestigt, in verschiedene Höhenlagen eingestellt werden

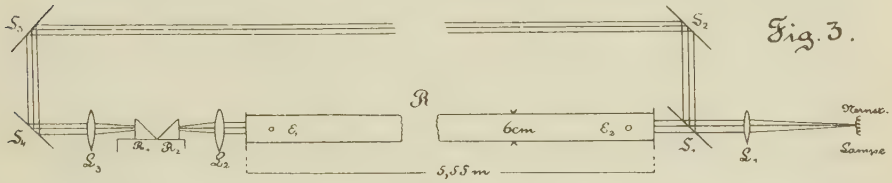


Fig. 3.

konnte. Das Licht trat durch ein total reflektierendes Prisma in die Röhre ein und durch ein ebensolches wieder aus, von wo es dann in den Apparat gelangte. Eine solche Röhre muss einen ziemlich grossen Durchmesser haben, damit das Licht, welches von der Oberfläche, und das, welches vom Spiegel reflektiert wird, getrennt werden kann. Aber da auch beim klarsten Wasser eine Trübung des Spiegels durch Sedimentationen zu befürchten ist, so entschied ich mich bei den definitiven Versuchen für die Anordnung in horizontaler Richtung, wie sie auch von Spring bei seinen Versuchen benützt wurde. Eine $5^1/_2$ m lange Röhre *R* (s. Fig. 3) aus Zinkblech mit einem Durchmesser von 6 cm wurde horizontal auf sechs verstellbare eiserne Träger aufgelegt. Die Öffnungen an den Enden, die auf 5 cm Durchmesser abgeblendet waren, damit keine Reflexe an der Röhrenwand auftreten können, wurden verschlossen durch Platten aus Spiegelglas;

[1]) Martin Knudsen, Ann. der Hydrographie und maritimen Meteorologie, p. 192, 1901.

oben waren zwei Röhrchen E_1 und E_2 angebracht zum Eingiessen des Wassers. Die ganze Anordnung ist aus Fig. 3 ersichtlich. Das Licht wurde durch eine Linse L_1 mit einer Brennweite von 20 cm parallel gemacht, von wo es auf eine Spiegelglasplatte S_1 traf. Hier ging ein Teil durch, der andere wurde reflektiert. Der erste Teil ging durch die Röhre und die Linse L_2 (16 cm Brennweite) direkt zum Prisma R_2, der andere Teil (das Vergleichslicht) gelangte durch Reflexion an den Spiegeln S_2, S_3 und S_1 und durch die Linse L_3 (16 cm Brennweite) zum Prisma R_1.

Zur Beleuchtung ist wegen der Länge der absorbierenden Wassersäule eine ziemlich starke Lichtquelle nötig. Eine gewöhnliche Vakuumglühlampe genügt hier nicht. Ich versuchte es zuerst mit Bogenlicht, doch ist dieses wegen seiner Inkonstanz an Helligkeit und wegen des häufigen Umspringens des Lichtbogens (auch bei Benützung einer Kugel aus Mattglas) unbrauchbar. Ganz vorzüglich geeignet dagegen ist das Licht der Nernstlampe mit ihrer sehr grossen spezifischen Helligkeit. Diese brennt ruhig und hell, so dass ich fast alle Beobachtungen mit dieser ausführte. Die Messung selbst ging so vor sich, dass ich zuerst, ohne Wasser in der Röhre zu haben, den $\sphericalangle \alpha$ beobachtete, in derselben Weise wie auf den Seen. Dann füllte ich mittels eines Hebers die zu untersuchende Wasserprobe in die Röhre und erhielt so den $\sphericalangle \alpha'$. Die beim Übergang des Lichts in ein anderes Medium (Glas zu Luft oder Wasser) auftretenden Spiegelungen hatten, wie ich mich überzeugen konnte, keinen messbaren Einfluss auf die Einstellung. Zum Nachweis benützte ich ausser der grossen Röhre noch eine kleine von nur 5 cm Länge. Die übrige Aufstellung blieb dieselbe. Ich mass den $\sphericalangle \alpha$ einmal, wenn Luft in der langen Röhre war, und dann wenn Luft oder Wasser in der kurzen Röhre war. Es zeigte sich, das hier nur Schwankungen auftraten, die durchwegs innerhalb der Genauigkeitsgrenzen lagen.

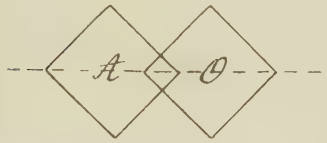
6. Taschenspektroskop.

In vielen Fällen hat mir ein geradsichtiges Taschenspektroskop nach H. W. Vogel von der Firma Schmidt & Hänsch in Berlin gute Dienste geleistet. An demselben befindet sich vorn ein verstellbarer Spalt; auch bei ganz geringer Öffnung ist das Instrument schon sehr lichtstark. Um das Spektrum zweier Lichtquellen mit

einander vergleichen zu können, lässt sich über die eine Spalthälfte ein total reflektierendes Prisma schieben, dem durch einen Spiegel Licht zugeführt wird.

7. Haidinger'sche Lupe.

Zur Untersuchung der Polarisation des aus dem Wasser austretenden Lichtes verwendete ich eine Haidinger'sche Lupe. Stellt man die beiden Quadrate so, wie in nebenstehender Figur angegeben, so gibt die gestrichelte Linie die Lage der Polarisationsebene des ordentlichen Strahles an. Bei Polarisation durch Reflexion ist in dieser Lage das Quadrat des ordentlichen Strahles hell, es verdunkelt sich bei einer Drehung um 90°.



II. Abschnitt.

Beobachtungen über die Farbe des Wassers.

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ging ich bei meinen Messungen über die Farbenzusammensetzung der Seen von ganz reinem, „optisch leerem" Wasser aus, d. h. von einer Flüssigkeit, welche der chemischen Verbindung H_2O möglichst nahe kommt.

Um wirklich reines Wasser zu erhalten, muss man gewöhnliches Wasser wiederholt destillieren über Kalilauge und übermangansaurem Kali. Ich wandte eine zweimalige Destillation an, was bei der grossen Reinheit des Münchener Wasserleitungswassers vollkommen genügt. Zum Transport dieses Wassers vom Destillierapparat bis zur Zinkröhre benützte ich Glasgefässe, die schon längere Zeit mit destilliertem Wasser gefüllt gewesen waren. Sie wurden vor dem Gebrauch mit Salpetersäure gereinigt und schliesslich noch die Innenseite einige Stunden lang einem Dampfstrahl ausgesetzt, so dass schliesslich der Betrag des im Wasser gelösten Glases jedenfalls nur noch ein minimaler war.

Die Zinkröhre, in welche das Wasser schliesslich eingefüllt wurde, war zuerst gründlich mechanisch gereinigt und dann öfters mit destillirtem Wasser ausgespült worden. Die Beobachtung geschah

an demselben Tage, an welchem das Wasser destilliert worden war. Die Resultate sind folgende (vgl. auch Tafel I, wo die folgende Absorptionskurve graphisch dargestellt ist):

Doppelt destilliertes Wasser.

(λ = Lichtwellenlänge, A = Absorptionskoeff. pro Meter.)

λ	A	λ	A	
658	0,320	602	0,173	
643	0,291	590	0,089	
622	0,239	579	0,049	$d = 5{,}55$ m.
617	0,244	558	0,038	
612	0.233	522	0.002	
607	0,200	494	0,002	

Um nun dieses reine Wasser optisch leer zu machen, kann man auf verschiedene Weise verfahren. Herr Professor Spring hatte die Liebenswürdigkeit, mir einige von ihm selbst erprobte Methoden mitzuteilen. Hiernach kann man den Zweck erreichen, entweder durch 12—15maliges Filtrieren durch Tierkohle oder durch Fällung der im Wasser suspendierten Staubteilchen mit einem farblosen Elektrolyten, z. B. Zinkchlorid. Da das Filtrieren einer so grossen Wassermasse zu viel Zeit in Anspruch nahm und man dabei doch nicht sicher ist, dass wirklich kein Staub mehr im Wasser ist, so entschied ich mich für den Fällungsprozess. Ich vermischte das reine Wasser mit einer Lösung von Zinkchlorid und füllte das Ganze in die oben erwähnte Röhre ein. Diese wurde, um den Inhalt vor Temperaturschwankungen möglichst zu schützen, mit Watte umwickelt und in einem gleichmässig temperierten vor Zug geschützten Kellerraum des Laboratoriums aufgestellt. Nachdem das Wasser einen Monat gestanden war, wurde die Farbe untersucht. Das Resultat ist folgendes:

Optisch leeres Wasser.

Kurve auf Tafel IX.

λ	A	λ	A	
658	0,328	590	0,095	
643	0,293	579	0,051	$d = 5{,}55$ m.
617	0,247	558	0,028	
607	0,205	522	0.002	Von $\lambda = 522$
602	0,166	an ist keine Absorption mehr zu beobachten.		

Vergleicht man diese Werte mit den Werten, die beim reinen Wasser vor Behandlung mit Zinkchorid gewonnen worden waren,

so sieht man, dass die Farbenzusammensetzung, aber auch die Durchsichtigkeit die gleiche geblieben ist, ein Zeichen, dass in dem doppelt destillierten Wasser die Staubteilchen schon so ausserordentlich selten sind, dass sie in einer Wassersäule von $5\,^1/_2$ m Länge keine merkliche Trübung mehr erzeugen können. Blickte man durch die beleuchtete Röhre hindurch, so war das Wasser von einer wundervollen Klarheit, das gegenüber liegende Ende erschien etwas bläulich gefärbt. Nur an dieser Färbung erkannte man, dass überhaupt etwas anderes als Luft in der Röhre war. Sehen wir uns das Absorptionsspektrum des reinen Wassers etwas näher an, so können wir aus den Kurven folgendes erkennen: Im Rot ist starke Absorption vorhanden bis herab zur Wellenlänge $\lambda = 620$ μμ. Zwischen 620 und 610 μμ tritt ein charakteristischer Absorptionsstreifen auf. Dann nimmt die Absorption rasch ab und verliert sich gegen das blaue Ende des Spektrums zu fast ganz. Wie schon in der Einleitung erwähnt, hat Soret nachgewiesen, dass auch im Ultraviolett grosse Lichtdurchlässigkeit herrscht. Was den Verlauf der Absorption im Rot betrifft, jenseits des Messbereichs des Spektrophotometers, so nimmt dieselbe mit wachsenden Wellenlängen immer mehr zu. Der auch früher schon erwähnte Absorptionsstreifen in der Nähe der *C*-Linie ist mit einem lichtstarken Spektralapparat bei einer Wassersäule von $5\,^1/_2$ m eben noch sichtbar, dann aber folgt fast vollkommene Absorption. Nach Desains und Aymonnet[1]) sind im Infrarot auch noch einige Absorptionsstreifen vorhanden.

In der Einleitung habe ich eine Gleichung für den Absorptionskoeffizienten angeführt, die von Boas aufgestellt wurde. Sie lautete:

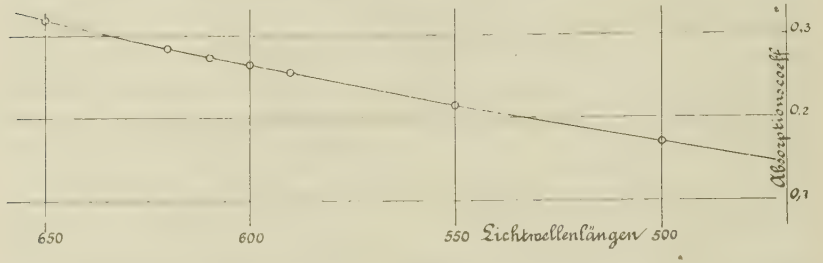
$$A = 0{,}0001\ (0{,}825\,\lambda^2 + 3{,}05\,\lambda - 503).$$

Setzt man unter Berücksichtigung der von Boas angegebenen Abkürzungen verschiedene Wellenlängen ein, so erhält man für A folgende Werte.

λ	A	λ	A
67	0,341	59	0,255
65	0,318	55	0,216
62	0,285	50	0,171
61	0,275	47	0,146
60	0,265		

[1]) Desains und Aymonnet, Compt. rend. 81, p. 423.

Konstruiert man hiefür in analoger Weise wie vorhin eine Kurve (siehe nebenstehende Figur), so sieht man, dass dieselbe



durchaus nicht den Charakter einer Wasserkurve besitzt, dass also die Gleichung zur Berechnung von Absorptionskoeffizienten nicht verwendbar ist.

Für Wasser der Münchener Wasserleitung, einem anerkannt vorzüglich reinen Quellwasser, ergaben sich folgende Werte.

Wasserleitungswasser.

λ	A	λ	A	
658	0,387	590	0,123	
643	0,327	579	0,081	
622	0,291	558	0,054	$d = 5{,}55$ m.
617	0,284	522	0,039	
612	0,260	494	0,018	
602	0,205	464	0,006	

Wurde dieses Wasser auf gewöhnliche Weise ohne Zusatz von Kalilauge und Kaliumpermanganat einmal destilliert, so erhielt ich für A die in nachstehender Tabelle angegebenen Werte.

Einfach destilliertes Wasser.

λ	A	λ	A	
658	0,328	579	0,071	
643	0,308	558	0,058	
617	0,282	522	0,038	$d = 5{,}55$ m.
602	0,223	494	0,018	
590	0,124	von hier ab keine merkliche Absorption mehr.		

Man sieht aus dem Vergleich mit der vorigen Tabelle, dass durch einfache Destillation noch kein sehr bemerkbarer Unterschied vom Quellwasser erzielt wurde, ja es scheint, als ob trotz vorheriger gründlicher Reinigung des Destillierapparates einige Verunreinigungen,

wahrscheinlich organischer Natur, mit hereingekommen seien. (Vgl. die Werte von A bei $\lambda = 602$.)

Alle Abweichungen vom Blau des reinen Wassers sind durch Anwesenheit von Fremdkörpern verursacht. Ob diese im Zustand der Lösung vorhanden sind, oder ob es ungelöste suspendierte Teilchen sind, soll jetzt noch nicht entschieden werden. Diese Abweichungen habe ich nun ihrer Grösse nach an verschiedenen Seen des bayerischen Hochgebirges, des oberbayerischen Vorlandes und des bayerischen Waldes festgestellt.

Bevor ich die Resultate im einzelnen angebe, möchte ich noch erwähnen, dass jeder Messung mit dem Photometer eine Beobachtung der Farbe mit dem kleinen Taschenspektroskop vorausging. Mit grosser Deutlichkeit kann man schon hier die Farbenzusammensetzung erkennen. Dieses lichtstarke Instrument lässt die Absorption im Rot sehr gut wahrnehmen, ferner tritt der dem Wasser eigentümliche Absorptionsstreifen im Orange als dunkler Streifen scharf hervor, man sieht die Aufhellung im Gelb und Grün und, je nach dem betreffenden Wasser, die Durchlässigkeit oder Absorption im Blau.

Es folgen nunmehr, nach der Zeit der Beobachtung geordnet, die Messungen an den verschiedenen Seen. Wie früher bedeuten hier λ die Lichtwellenlänge und A die Grösse des Absorptionskoeffizienten pro Meter Tiefe. Die Bedingungen, unter welchen eine Messung in der Natur überhaupt möglich ist, sind im vorigen Abschnitt auf S. 18 ausführlich angegeben. Die Kurven für die folgenden Seen finden sich auf Tafel I.

Kochelsee.

Beobachtung am 16. August			Beobachtung am 5. Sept. 1902.		
λ	A		λ	A	
644,5	0,499		—	—	
610	0,441		—	—	
603,5	0,402		—	—	
597	0,361	$d_2 = 2{,}57$ m	—	—	$d_2 = 2{,}28$ m
591,5	0,325	$d_1 = 0{,}54$ „	591,5	0,368	$d_1 = 0{,}34$ „
580	0,269	$d = 4{,}06$ m.	—	—	$d = 3{,}38$ m.
569	0,239	Sichttiefe 6 m.	—	—	Sichttiefe 4 m.
548,5	0,265	Vormittag.	548,5	0,299	Vormittag.
531	0,285		501	0,346	Wegen auftretenden Wellenganges konnte ich nicht mehr Werte erhalten.
501	0,312		478	0,381	
488,5	0,337		—	—	

Um zu sehen, wie die Werte der Absorptionskoeffizienten eines und desselben Sees in verschiedenen Jahreszeiten übereinstimmen, holte ich mir, da mir die Zeit fehlte solange zu warten, bis ich in der Natur eine Messung hätte vornehmen können, in einem Glasballon eine Wasserprobe aus dem See und füllte sie in die Zinkröhre. Dabei erhielt ich folgende Resultate:

In der Röhre im Laboratorium am 24. März 1903:

λ	A	
674	0,419	
658	0,389	
643	0,351	
617	0,341	
602	0,289	
590	0,220	$d = 5{,}55$ m.
579	0,171	
558	0,168	
522	0,184	
494	0,216	
473	0,242	

Aus diesen Messungen, zu welchen das Wasser dreier ganz verschiedener Stellen und zu verschiedenen Jahreszeiten benützt wurde, ergibt sich das wichtige Resultat, dass die Farbenzusammensetzung eines Sees, vielleicht bis auf minimale Abweichungen, konstant bleibt, dass also auch eine Trübung, welche die Sichttiefe um mehrere Meter verändert, auf die Art der Farbe keinen Einfluss hat. Es wechselt bloss ihre Intensität. Die kleineren Werte von A bei der Messung im Laboratorium rühren davon her, dass das Wasser über Nacht in der Röhre gestanden war, während welcher Zeit gröbere trübende Teilchen sich zu Boden geschlagen hatten, so dass das Wasser durchsichtiger wurde.

Walchensee.

Hier ist folgendes vorauszuschicken. Eine Messungsreihe am 19. August 1902 ergab wohl gute Werte für den $\sphericalangle \alpha'$. Bei der Bestimmung von $\sphericalangle \alpha$ aber war der See leicht bewegt, so dass auf der Scheibe das lästige Flimmern auftrat. Infolgedessen konnten die Werte von α nur mehr ungenau erhalten werden. Die Resultate sind trotzdem in der Tabelle mit aufgenommen. Eine vollständig befriedigende Messung gelang erst am 3. September. Vergleicht man die für beide Beobachtungsreihen gefundenen Werte und denkt

sie sich als Kurven aufgetragen, so ergibt sich, dass sie zwar, obwohl die Sichttiefen an beiden Tagen ungefähr gleich waren, in bezug auf die absolute Grösse von A von einander etwas abweichen, dass aber die Kurven in ihrem Gesamtverlauf wohl übereinstimmen.

Beobachtung am 19. August

λ	A	
—	—	
630	0,435	
614	0,416	
610	0,398	
603,5	0,362	
—	—	
591,5	0,282	$d_2 = 3{,}93$ m
580	0,214	$d_1 = 0{,}30$ „
569	0,189	$d = 7{,}26$ m.
558	0,175	Sichttiefe 20,2 m.
548,5	0,177	
514,5	0,187	
501	0,188	
478	0,204	
—	—	

Beobachtung am 3. Sept. 1902.

λ	A	
637	0,315	
630	0,303	
616	0,303	
610	0,292	
603,5	0,254	
597	0,212	
591,5	0,181	$d_2 = 3{,}65$ m
580	0,143	$d_1 = 0{,}38$ „
569	0,118	$d = 6{,}54$ m.
558	0,094	Sichttiefe 20,5 m.
548,5	0,100	
531	0,101	
501	0,102	
478	0,115	
469	0,119	

Eibsee.

(10. September 1902.)

λ	A	
630	0,363	
622,5	0,353	
616	0,363	
608,5	0,336	
603,5	0,298	
591,5	0,219	$d_2 = 3{,}61$ m
580	0,170	$d_1 = 0{,}38$ „
569	0,161	$d = 6{,}46$ m.
558	0,151	Sichttiefe 17,5 m.
548,5	0,150	
531	0,151	
501	0,153	
478	0,162	

Badersee und Umgebung des Eibsees.

Die Farbe dieses erstgenannten kleinen, in der Nähe des Eibsees am Fusse des Zugspitzmassivs gelegenen Sees, konnte ich nicht

photometrisch bestimmen, wohl aber untersuchte ich sie mit dem Taschenspektroskop. Ich fand dabei eine völlige Übereinstimmung mit der des Eibsees, also ein tiefes bläuliches Grün. Auch die in nächster Nähe des Eibsees befindlichen kleinen Seen: Frillensee, Unter- und Steingrünsee, zeigen dieselbe Farbe, sind sie ja doch von ihrem grösseren Nachbarn vermutlich nur durch Bergstürze getrennt worden. Da ihre Tiefe sehr gering ist, meist nur einige Meter, so scheint überall der Grund durch. Dies gibt besonders dem Steingrünsee, der der tiefste ist (8—10 m), eine ganz wunderbare herrlich grüne Farbe.

Die blauen Gumpen.

(11. September 1902.)

Eine besondere Eigentümlichkeit bieten die beiden wohl vor nicht gar zu langer Zeit infolge von Bergstürzen erst aufgestauten Becken der sogenannten blauen Gumpen bei Partenkirchen: ihr Wasser zeigt nämlich, wie schon der Name sagt, ein ganz ausgesprochenes Blau. Da ich hier wegen örtlicher Verhältnisse (die beiden Seen liegen 3 resp. $3^1/_2$ Stunden von Partenkirchen entfernt im oberen Teile des Reintales in einer Höhe von 1117 resp. 1174 m, sie sind auch nicht befahrbar) ebenfalls keine photometrischen Messungen ausführen konnte, so begnügte ich mich damit, aus den durch Einwerfen von Steinen entstandenen Wellen die Farbe annähernd zu bestimmen. Ich fand sie ganz entsprechend der des Achensees. Man sieht auch hier überall den Grund durch, er besteht aus hellem Letten. Die Tiefe scheint einige Meter zu betragen.

Achensee.

(15.—17. September 1902.)

λ	A	
644	0,430	
630	0,407	
616	0,411	
603,5	0,363	$d_2 = 2{,}41$ m
591,5	0,279	$d_1 = 0{,}19$ „
569	0,209	$d = 4{,}44$ m.
548,5	0,197	Sichttiefe 11 m.
531	0,194	
501	0,160	
478	0,153	
469	0,144	

Die Farbenverteilung nähert sich bei diesem See, wie man aus dem Vergleich der entsprechenden Kurven ersieht, am meisten der des reinen Wassers, nur ist der See ziemlich trüb, daher die grösseren Werte von A. Die Farbe ist, wenn man sie mit der des Himmels vergleicht, gleich dem helleren, schon etwas grünlicheren Blau am Horizont.

Eine Untersuchung des Wassers an verschiedenen Stellen des Sees ergab, dass die Farbe überall sich gleich bleibt, nicht dass der See etwa, wie schon behauptet wurde, am Südende grünlicher ist als im Norden. Die scheinbare andere Färbung rührt nur daher, dass man an solchen Stellen den Grund durchsieht.

Königsee.

(19. September 1902.)

λ	A	
644	0,411	
—	—	
616	0,385	
603,5	0,341	$d_2 = 3{,}38$ m
591,5	0,262	$d_1 = 0{,}41$ „
569	0,198	$d = 5{,}94$ m.
548,5	0,198	Sichttiefe 10,5 m.
531	0,205	
514,5	0,224	
488,5	0,237	
469	0,272	

Obersee.

(20. September 1902.)

λ	A	
644	0,396	
630	0,363	
616	0,349	
603,5	0,284	$d_2 = 3{,}55$ m
591,5	0,181	$d_1 = 0{,}42$ „
580	0,149	$d = 6.26$ m.
569	0,133	Sichttiefe 16.5 m.
548,5	0,132	
531	0,126	
488,5	0,133	
478	0,128	

Dem liebenswürdigen Entgegenkommen des kgl. Forstmeisters Herrn Purpus in Berchtesgaden habe ich es zu verdanken, dass mir zu meinen Messungen ein Dienstschiff des kgl. Forstamts zur Verfügung stand, und dass es mir ermöglicht wurde, auch den am Südende des Königsees gelegenen Obersee zu befahren. Ich möchte an dieser Stelle nochmals meinen herzlichsten Dank hierfür wiederholen.

Würmsee.

(23. September 1902.)

Schon viele Male hatte ich es versucht, eine brauchbare Messungsreihe mit dem Photometer auch für diesen See zu erhalten, doch wollten sich nie alle Vorbedingungen zu einem glücklichen Gelingen einstellen; denn bei der Grösse des Sees und bei seiner flachen Lage ist der Seespiegel nur äusserst selten vollständig in

Ruhe. Ich bestimmte daher mit dem Taschenspektroskop den Charakter der Farbe und fand eine ziemlich vollständige Übereinstimmung mit der des Kochelsees. Zum Zwecke einer photometrischen Messung sah ich mich gezwungen, im Laboratorium mit der Röhre mit Würmseewasser eine Beobachtungsreihe anzustellen. Das Resultat ist folgendes:

In der Röhre im Laboratorium.

λ	A	
658	0,473	
643	0,449	
617	0,428	
607	0,413	
602	0,383	
590	0,310	$d = 5{,}55$ m.
558	0,285	
522	0.311	
494	0,351	
473	0,377	

Staffelsee.

(24. September 1902.)

Schon mit dem Taschenspektroskop ergab sich hier ein fundamentaler Unterschied gegenüber sämtlichen vorher untersuchten Gewässern. Während sonst überall, auch beim Kochelsee und Würmsee, das Blau wenigstens teilweise sichtbar war, so ergab sich hier eine vollständige Absorption für diese Farbe. Bei diesem und bei dem noch folgenden See war daher das sichtbare Spektrum nur mehr sehr kurz. Die photometrische Untersuchung ergab folgendes Resultat:

λ	A	
644	0,461	
630	0,460	
616	0,489	
603,5	0,437	
591,5	0,389	$d_2 = 2{,}65$ m
580	0,378	$d_1 = 0{,}21$ „
569	0,391	$d = 4{,}88$ m.
548,5	0,442	Sichttiefe 7,5 m.
531	0,502	
514,5	0,571	
501	0,623	

Die Farbe ist, durch das Sehrohr betrachtet, ein herrliches leuchtendes Braungrün.

Der folgende See gehört zu den sogenannten schwarzen Seen. Diese kommen ausschliesslich im Urgebirge vor, wie im bayerischen und böhmischen Wald, im Fichtelgebirge, Schwarzwald u. s. w. Während man bei anderen Seen meist ohne Hilfsmittel schon die Farbe erkennen kann, erscheinen diese Seen vollständig schwarz.

Grosser Arbersee (im bayer. Wald).

(26. September 1902.)

λ	A	
644	0,733	
630	0,734	
616	0,733	$d_2 = 1{,}69$ m
603,5	0,725	$d_1 = 0{,}32$ „
591,5	0,685	$d = 2{,}74$ m.
569	0,727	Sichttiefe 6 m.
548,5	0,836	
531	0,933	
514,5	1,032	

Wenn man die Scheibe ins Wasser taucht, so nimmt sie sofort intensiv bräunliche Färbung an. Tiefer unten wird sie bald sehr dunkel, bei 3 m verschwindet sie schon. Blendet man aber das Oberflächenlicht mit dem Rohre ab, so leuchtet sie wieder hell auf in kastanienbrauner Farbe, während das Wasser daneben einen grünlichen Ton hat. Letzterer Umstand rührt daher, dass wir einen Gegensatz haben zwischen der Farbe, unter der das Weiss der Scheibe im Wasser erscheint, und der Farbe des Sees selbst. Es scheint hier der Hinter- oder vielmehr Untergrund etwas auszumachen. Die erstere Erscheinung, die der Wiederaufhellung beim Abblenden durch das Rohr, die ich schwächer auch schon am Staffelsee beobachten konnte, hat die Ursache, dass der dunkle, von oben gesehen fast schwarze See die auftreffenden Strahlen an der Oberfläche sehr stark reflektiert, weshalb die schwächer erleuchtete Scheibe gegenüber der glänzenden Spiegelfläche den Augen bald entschwinden muss.

Eine Diskussion der Seenkurven kann erst weiter unten folgen.

Vergleich der durch Farbenskalen bestimmten Wasserfarben mit der wirklichen Seefarbe.

Um mich von der Brauchbarkeit der in der Einleitung erwähnten Farbenskalen zu unterrichten, habe ich die Absorpstionskurven für die drei von Ule verwendeten Substanzen in der angegebenen Konzentration spektrophotometrisch hergestellt. Auf Tafel II sind die Kurven für das Methylenblau gezeichnet. Die obere hat zu Ordinaten die Absorptionskoeffizienten für eine Schichtdicke von 0,6 mm, die untere für eine solche von 0,4 mm. Auf Tafel III sind die Kurven von Kaliumchromat für Schichtdicken von 0,9 und 0,6 mm, auf Tafel IV die von Kaliumdichromat für Schichtdicken von 0,15 und 0,10 mm. Warum gerade diese Schichtdicken gewählt wurden, wird später gesagt werden. In den folgenden Tabellen sind die Werte angegeben. Die erste Vertikalreihe enthält die Wellenlängen, für welche die Absorption gemessen wurde. In der zweiten Reihe stehen die aus Formel 4 berechneten Werte des Absorptionskoeffizienten. Die Messungen wurden ausgeführt nach der bekannten Methode mit dem Schulz'schen Körper.[1])

Methylenblau (0,005 g auf 100 ccm Wasser).

Schichtdicke 6		Schichtdicke 4	
λ	A	λ	A
687	0,155	687	0,104
675	0,321	675	0,214
663	0,434	663	0,289
651	0,407	651	0,271
641,5	0,380	641,5	0,253
633	0,364	633	0,243
621,5	0,405	621,5	0,270
613,5	0,448	613,5	0,299
600	0,371	600	0,247
564,5	0,141	564,5	0,094
552	0,106	552	0,070
—	—	542,5	0,059
529	0,067	529	0,045
513	0,048	513	0,032

Beim Methylenblau (ich verdanke diesen Farbstoff in vorzüglicher Reinheit der Güte des Herrn Professor Schultz an der

[1] Vgl. etwa Wiedemann und Ebert, phys. Prakt., 4. Aufl., 1899, p. 371.

hiesigen technischen Hochschule) ergab sich, nebenbei bemerkt, eine Eigentümlichkeit, wie sie in ähnlicher Weise auch von Walter[1]) beobachtet worden ist. Während nämlich bei den meisten Lösungen bezüglich ihrer Absorption ein Parallelismus von Konzentration und Schichtdicke besteht, so ist dies hier nicht der Fall. Bei höheren Konzentrationen ist der Absorptionsstreifen im Orange stärker als der im Rot. Je weiter die Verdünnung fortschreitet, um so schwächer wird derselbe, bis er endlich ganz verschwindet. Der Streifen im Rot dagegen bleibt immer erhalten. Dies Resultat geht aus folgenden Messungen hervor: (Kurven s. Tafel IIa). Die Werte des Absorptionskoeffizienten für die unverdünnte Ulesche Lösung sind in der ersten Tabelle angegeben. Ich verminderte nun die Konzentration auf $^5/_{10}$ und $^1/_{10}$ und erhielt dabei folgende Werte:

Unverdünnt		$^5/_{10}$ verdünnt		$^1/_{10}$ verdünnt	
λ	A	λ	A	λ	A
687	0,259	687	0,141	681	0,095
675	0,535	675	0,295	675	0,131
663	0,723	663	0,395	663	0,178
651	0,679	651	0,352	651	0,162
641,5	0,633	641,5	0,295	641,5	0,145
633	0,607	633	0,265	633	0,122
621,5	0,675	621,5	0,271	621,5	0,115
613,5	0,747	613,5	0,278	613,5	0,108
600	0,618	600	0,216	600	0,095
564,5	0,235	564,5	0,060	564,5	0,046
552	0,176	552	0,037	552	0,040
542,5	0,147	542,5	0,023	—	—
529	0,112	529	0,023	—	—
513	0,080	513	0,010	—	—

Kaliumchromat (0,25 g auf 100 ccm Wasser).

Schichtdicke 9		Schichtdicke 6	
λ	A	λ	A
506	0,009	506	0,006
499	0,013	499	0,008
493	0,020	493	0,013
487	0,032	487	0,021

[1]) B. Walter, Wied. Ann., 36, 1889, p. 518.

Kaliumdichromat (5,0 g auf 100 ccm Wasser).

Schichtdicke $1^1/_2$		Schichtdicke 1	
λ	A	λ	A
556	0,008	556	0,005
546,5	0,016	546,5	0,011
537,5	0,032	537,5	0,021
529	0,059	529	0,040
521	0,103	521	0,061

Setzt man die Kurven der drei Substanzen entsprechend den Verschiebungen in der Uleschen Skala additiv zusammen (Tafel V), so sollte man eine Kurve erhalten, die die gesuchte Farbe des Wassers angibt. Ule hat z. B. auf S. 160 mitgeteilt, durch welche Einstellung seiner Skala die Farbe des Würmsees erhalten wird:

nämlich: blau 4, gelb 6, braun 1, oder für einen dunkleren Ton blau 6, gelb 9, braun $1^1/_2$

(daher oben die verschiedenen Schichtdicken der Substanzen). Auf Tafel V ist die diesen Angaben entsprechende Addition der Kurven ausgeführt und dazu die wirkliche Absorptionskurve des Würmseewassers eingezeichnet worden. Man ersieht auf den ersten Blick den fundamentalen Unterschied: während nämlich jedes Wasser, vom reinsten bis zum trübsten, eine ganz ausgesprochene Absorption im Rot zeigt, die um so grösser wird, je länger die Lichtwellen werden, so fällt hier die Kurve im Rot steil ab, so dass also die resultierende Mischfarbe immer an Rot sehr viel reicher sein wird, als sie der Wasserfarbe entsprechend sein dürfte. Keinesfalls darf daher eine Lösung von Methylenblau als färbende Flüssigkeit verwendet werden. Man müsste einen anderen blauen Farbstoff ausfindig machen, der der Eigenschaft des Wassers, die roten Strahlen fast vollständig zu absorbieren, mehr Rechnung trüge. Auch die beiden anderen Substanzen, vor allem das Kaliumdichromat, sind nicht geeignet; denn kein Wasser, nicht einmal das an Blau ärmste, absorbiert die kurzen Wellenlängen in der Weise, wie es dieser Farbstoff tut. Auch die Forel-Ule'sche Skala habe ich mir hergestellt und die Substanzen spektralanalytisch untersucht. Dabei treten ähnliche Unzuträglichkeiten auf. Die ammoniakalische Kupfersulfatlösung absorbiert Gelb sehr stark, aber je grösser im Rot die Wellenlängen werden, um so durchlässiger ist sie für die Lichtstrahlen. Die Kobaltsulfatlösung würde sich von allen angegebenen Substanzen

noch am meisten zur Darstellung von Wasserfarben eignen, da sie das Blau mässig absorbiert, das rote Licht jedoch lässt sie immer noch zu stark durch, um wirklich zu dem angegebenen Zwecke brauchbar zu sein.

Um nun auf andere Weise wenigstens eine ungefähre Schätzung (denn um eine solche allein handelt es sich ja auch bei den Skalen nur) von der Farbe eines Sees zu gewinnen, möchte ich einen andern Vorschlag machen, der jedenfalls den Vorteil der Einfachheit hat. Wie ich am Schluss meiner Abhandlung zeigen werde, kann man sämtliche Gewässer bezüglich ihrer Farbe in vier Gruppen unterbringen.

1. Gruppe: blau wird nicht absorbiert
2. „ „ „ schwach „
3. „ „ „ stark „
4. „ „ „ vollständig „

Diese Unterschiede lassen sich aber mit Hilfe eines Taschenspektroskops bei einiger Übung mit grosser Genauigkeit konstatieren. Ein solches Instrument ist stets leicht in der Tasche mitzuführen, man braucht zur Ausführung der Bestimmung nur mehr ein kleines geschwärztes Rohr, um die Oberflächenreflexe abblenden zu können. Damit man vergleichbare Resultate bekommt, muss der Spalt des Spektroskops immer eine und dieselbe Breite haben. Dies lässt sich leicht dadurch erreichen, dass man an der Vorrichtung, durch die der Spalt reguliert wird, eine Marke anbringt. Die Angabe einer der erwähnten Typen genügt aber vollkommen, um den Charakter der Wasserfarbe eines Sees feststellen zu können, und man hat zudem den Vorteil, eine wirkliche physikalisch richtige Vorstellung von der Zusammensetzung des Wassers gewonnen zu haben.

III. Abschnitt.

Durchsichtigkeit des Wassers.

Die Durchsichtigkeit eines Gewässers hängt aufs Engste zusammen mit der scheinbaren Farbe, in der uns dasselbe erscheint. Wir haben am Kochelsee gesehen, dass eine Trübung die relative Farbenzusammen-

setzung an sich zwar nicht zu ändern vermag, dass uns aber ein klarer See mit durchsichtigem Wasser viel dunkler erscheint, als ein solcher mit grünem Wasser.

Bevor ich meine Messungsresultate anführe, möchte ich einige Bedenken zerstreuen. Es ist vielfach geäussert worden, man müsse solche Messungen zu einer bestimmten Jahreszeit ausführen, wenn die Sonnenstrahlen unter einem gewissen Winkel in den See einfallen und man müsse überhaupt jedesmal dieselben äusseren Bedingungen haben. Ich kann aber auf Grund vieler Beobachtungen mit Sicherheit die Behauptung aufstellen, dass alle solche Vorsicht unnütz ist. Nach dem psychophysischen Grundgesetz von Weber und Fechner empfindet das menschliche Auge die Unterschiede zweier Reize nur dann, wenn das Verhältnis dieser Reizintensitäten ein nahezu konstantes Mass überschreitet. Helmholtz konnte dieses Verhältnis auf $^1/_{133}$ festsetzen. Wir nehmen aber auch hier bei dem Versenken der Scheibe nur Helligkeitsunterschiede wahr, die fast unabhängig sind von der Lichtstärke der Umgebung. Die Scheibe wird also dem Auge dann nicht mehr sichtbar sein, wenn der Unterschied der Helligkeit vom Wasser und der eingetauchten Scheibe das Verhältnis von $^1/_{133}$ erreicht hat. Dementsprechend fand ich auch die Sichttiefe an einem Tage bei vollem Sonnenschein und bei starker Bewölkung, ja selbst einmal im Sommer noch abends 9 Uhr nach Eintritt der Dunkelheit, als schon Sterne schienen, völlig konstant zu 6 m, wohl ein sicherer Beweis dafür, dass man sich hier nicht nach Sonnenstand oder Bewölkung zu richten habe.

Ich teile zunächst meine Beobachtungen über Sichttiefen im Kochel- und Walchensee im einzelnen mit.

Kochelsee.

Datum	Sichttiefe in m	Temperatur in Cels. oben	unten	Wetter	Beschaffenheit des Wassers
Januar 1901	10,0	—	—	—	—
Mai 11. 1902	8,0	8,0	—	etwas Sonne	—
Mai 19.	7,5	8,0	6,5	bedeckt	ziemlich rein
Mai 22.	6,0	8,0	8,0	Regen	trüb
Mai 23.	6.0	8,5	8,5	bedeckt	ziemlich rein
Mai 31.	7,0	10,0	8,5	sonnig	ziemlich rein
Juni 2.	6,0	15,5	9,5	sonnig	ziemlich rein
Juni 15.	4,5	14,5	13,0	bewölkt	ziemlich rein
Juni 16.	5,0	14,0	13,0	bedeckt	ziemlich trüb

Datum	Sichttiefe in m	Temperatur in Cels. oben	unten	Wetter	Beschaffenheit des Wassers
Juni 29. 1902	5,5	22,0	16,0	sonnig	trüb
Juli 27.	4,5	19,2	17,8	sonnig	sehr trüb
Aug. 16.	6,0	17,4	17,4	wolkenlos	ziemlich rein
Aug. 18.	6,0	19,6	17,1	bedeckt	ziemlich rein
Aug. 22.	7,0	18,0	16,5	bedeckt	ziemlich rein
Aug. 26.	7,0	18,3	16,5	bedeckt	ziemlich rein
Aug. 28.	6,0	20,6	17,5	sonnig	trüb
Aug. 30.	5,0		—	sonnig	trüb
Sept. 2.	4,5	19,8	18,8	sonnig	trüb
Sept. 3.	4,2	—	—	wolkenlos	trüb
Sept. 5.	4,3	20,3	19,4	wolkenlos	trüb
Sept. 29.	5,2	15,3	15,2	sonnig	mässig trüb
Nov. 1.	6,0	9,6	9,8	neblig	ziemlich klar
Dez. 7.	9,5	5,2	5,0	Nebel	sehr klar
Jan. 3. 1903	9,5	3,4	3,4	trüb	sehr klar
Febr. 1.[1])	8.0	3,0	3,4	sonnig	mässig klar
März 20.[2])	5,0	3,8	3,8	wolkenlos	trüb
März 22.	6,0	3,8	3,8	wolkenlos	trüb

Walchensee.

Datum	Sichttiefe in m	Temperatur in Cels. oben	unten	Wetter	Beschaffenheit des Wassers
Mai 19. 1902	19.5	6,0	5,0	bedeckt	mässig klar
Mai 24.	17,0	7,0	6,0	etwas Sonne	ziemlich unrein
Juni 15.	18,5	11,0	5,0	bewölkt	klar
Juni 16.	19,5	11,3	5,0	bedeckt	sehr klar
Juni 29.	16,0	13,5	6,4	sonnig	ziemlich unrein
Aug. 19.	20,2	18,6	6,9	wolkenlos	sehr klar
Aug. 27.	20,5	17,4	7,0	sonnig	sehr klar
Sept. 1.	21,0	17,8	6,5	neblig	sehr klar
Sept. 3.	20,5	18,4	7,6	wolkenlos	sehr klar
Sept. 29.	18,0	14,6	8,0	neblig	mässig klar
Dez. 8.	22,5	5,0	5,0	sonnig	sehr klar
Jan. 5. 1903	24,0	4,0	—	sehr trüb	sehr klar
März 22.	25,0	3,2	3,2	wolkenlos	sehr klar
Mai 16.	18,0	7,8	5,1	sonnig	mässig klar

[1]) Am 1. Februar 1903 war der See fest zugefroren. Zur Beobachtung wurde ein Loch in das Eis geschnitten.

[2]) Den Beobachtungen im März 1903 ging die Eis- und Schneeschmelze vorher. Später konnten keine Messungen mehr vorgenommen werden, da der ganze See infolge der Loisachregulierungsarbeiten unnatürlich getrübt war; so betrug z. B. im Mai 1903 die Sichttiefe kaum 1 m.

Betrachten wir nun die Veränderung der Sichttiefe eines Sees innerhalb eines Jahres etwas genauer (vgl. auch die Kurven auf Tafel VI), so fällt vor allem der grosse Unterschied zwischen Sommer und Winter auf. Wir sehen aber auch, dass innerhalb kleiner Zeiträume Schwankungen vorkommen bis zu einigen Metern. Wenn wir nach den Ursachen einer solchen Trübung und Wiederaufklärung des Sees fragen, so müssen wir, wie Ule bemerkt, zuerst einige lokale Einflüsse aus der Beobachtung eliminieren. Als solche führt er an: Starke Trübung durch Zuflüsse oder Staubwehungen, ungewöhnlich grossen Reichtum an Lebewesen. Eine Trübung durch Zuflüsse fällt nun bei den von mir zu Vergleichsobjekten gewählten Seen, bei Kochel- und Walchensee, ziemlich weg; während der Walchensee gar keinen bedeutenden Zufluss hat, so wird auch der einzige grössere Zufluss des Kochelsees, die Loisach, bisher nur wenig in Betracht kommen; denn erstens wurde bis letzten Herbst, wo die Loisachregulierungsarbeiten beim Einfluss der Loisach in den See begannen, ihre Hauptwassermasse einige Kilometer nördlich vor ihrem Eintritt in den See durch einen grossen Flosskanal abgeleitet, zweitens machte ich meine Sichttiefenbestimmungen gerade an dem der Loisachmündung entgegengesetzten Ende des Sees beim Joch, wo überdies der dort hereinfliessende Kesselbergbach stets, auch nach längerem Regen, nur sehr reines Wasser dem See zuführt.

Was nun die Staubwehungen betrifft, so glaube ich, dass diese bei der Trübung eines jeden Sees doch wohl mit in Betracht zu ziehen sind. Ule[1]) bemerkt auf S. 173: „Die Trübung des Wassers durch Staub müsste doch sehr gross sein, wenn sie dieses schon auf 3—4 m undurchsichtig machen sollte. Solche Staubmengen müssten für das Auge deutlich sichtbar sein.“ Ich führe als Beweis für meine Behauptung folgende Beobachtung an: Am 11. Mai 1902 war die Sichttiefe des Kochelsees noch 8 m, also noch immer eine der winterlichen grossen Sichttiefe entsprechende. In dieser Jahreszeit ist aber die Vegetation bereits soweit fortgeschritten, dass die Blüten mehrerer Blumenarten und besonders von Bäumen und Sträuchern schon wieder im Abfallen begriffen sind. Tatsächlich beobachtete ich auch auf der Oberfläche des Sees eine Anhäufung von kleinen Körperchen, die sich am Ufer, durch den Wellenschlag

[1]) Ule, Der Würmsee, p. 171.

zusammengetrieben, zu dichten schwarzen Klumpen zusammenballten. Die mikroskopische Untersuchung solcher Massen ergab, dass man hier hauptsächlich Blütenstaub, ferner organische Reste, Moose, Pilze, auch Infusorien und Kohleteilchen vor sich hatte. Sind diese Teilchen auch leichter wie Wasser, so saugen sie sich doch allmählich so mit Wasser voll, dass sie untersinken und sich lange Zeit schwimmend erhalten können. Wirklich war auch nach einiger Zeit von solchen Anhäufungen nichts mehr zu sehen. Dagegen hatte die Sichttiefe bis zum 22. Mai um 2 m abgenommen und das Wasser erschien, wenn man durch das Rohr in den See hineinsah, sehr trüb, erfüllt mit schwebenden Partikelchen, die deutlich mit dem blossen Auge wahrgenommen werden konnten. Ähnliche Vorgänge sind aber an jedem See denkbar, dessen Ufer mit Vegetation umgeben sind; also dürfen wir den Einfluss von äusseren Ursachen auf die Trübung durchaus nicht vernachlässigen.

Um einem Einwande zu begegnen, möchte ich bemerken, dass die Temperatur des Sees in der Zeit vom 11. bis 22. Mai sich nicht verändert hatte, also jedenfalls die Trübung nicht etwa aus Umschichtungen der Wassermassen oder dergleichen erklärt werden kann.

Noch eine Beobachtung kann ich geltend machen, die das Vorhandensein von Staub im Wasser nachweist. Füllt man Kochelseewasser in ein Glas und betrachtet es, indem man durch eine Sammellinse die Sonnenstrahlen darauffallen lässt, so bildet sich der Lichtweg im Wasser deutlich ab, es enthält also viele suspendierte Partikelchen. Beim Wasser des Kesselbergbaches ist diese Erscheinung lange nicht so stark. Die Staubteilchen müssen also von anderswo her in den See gelangt sein, und dass diese, wenn sie auch nur sehr fein sind, das Wasser zu trüben imstande sind, ist wohl kaum zu leugnen.

Dass der Staub jedoch nicht der einzige Faktor ist, der die Durchsichtigkeit des Wassers modifiziert, dürfte aus anderen Beobachtungen hervorgehen. Ohne vorausgehende schlechte Witterung trat im Kochelsee zwischen dem 26. August und 3. September plötzlich eine enorme Trübung ein. Die Sichttiefe ging von 7 m auf 4,2 m zurück. Wie bekannt, tritt nun in jedem See das Plankton auf, eine Tierwelt im kleinen, die je nach der Jahreszeit in verschiedenen Tiefen lebt. Nach Professor Hofer[1]) kommt das Plankton im Sommer

[1]) Hofer, Die Verbreitung der Tierwelt im Bodensee, Verein für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, XXVIII. Heft.

weiter an die Oberfläche, im Winter steigt es tiefer hinab, wahrscheinlich dem verschieden tiefen Eindringen des Lichts in den See folgend, aber durch seine grosse Zahl an Organismen dessen Durchsichtigkeit teilweise selbst mitbestimmend. Da nun zeitweise auch plötzliche Schwärme dieser kleinen Tiere auftreten und ihre Vermehrung eine kolossale ist, so ist es leicht denkbar, dass die starke Trübung des Kochelsees in der angegebenen Periode von einem solchen Planktonschwarm herrührte.

So können wir also annehmen, dass die plötzliche Zunahme der Undurchsichtigkeit des Sees im Frühjahr vor allem einer äusseren Ursache zuzuschreiben ist. Infolge dieser Trübung steigt das Plankton in die Höhe und trägt dadurch selbst zu einer weiteren Trübung bei. Kleine Schwankungen während des Sommers lassen sich vielleicht dadurch erklären, dass einige schwimmende Teilchen im Laufe der Zeit sich mit Wasser so angesaugt haben, dass sie untersinken wie Holz, das lange Zeit im Wasser gelegen hat, während andere Staubteilchen wieder zufliegen können. Grössere Schwankungen sind wohl plötzlich auftretenden Schwärmen des Planktons zuzuschreiben. Die Abnahme der Trübung im Herbst beginnt nach meiner Annahme dann, wenn durch Blütenstaub und dergleichen keine neue Zufuhr mehr kommt, indessen die schon vorhandenen Partikelchen unterzusinken beginnen, denn diese Klärung des Sees nimmt ihren Anfang nicht erst mit dem Beginn der kälteren Jahreszeit, sondern schon früher und die Zeit grösster Trübung fällt auch nicht erst in den Hochsommer, sondern in die Monate Juni und Juli, d. h. in die Hauptvegetationsperiode. Die Klärung schreitet, wie das Beispiel des Walchensees zeigt, den ganzen Winter über fort, erreicht ihren Höhepunkt also nicht dann, wenn das Wasser am dichtesten ist, sondern erst vor Wiederbeginn der Vegetation.

Ob auch die Temperatur auf die Sichttiefe einen merklichen Einfluss auszuüben imstande ist, werden wir erst im nächsten Abschnitt untersuchen.

Wie weit das Licht überhaupt in ein Gewässer eindringt, hängt natürlich mit der Grösse der Absorption für die einzelnen Farben aufs engste zusammen. Da nach der Definition der Absorptionskoeffizient der reziproke Wert derjenigen Schichtdicke ist, bei welcher die Intensität des einfallenden Lichtes auf $1/e$ gesunken ist, so kann man mit seiner Hilfe die Helligkeit für eine bestimmte Strahlen-

gattung in beliebiger Tiefe angeben. Zahlenwerte hiefür haben schon Hüfner und Albrecht gerechnet.

Bei den andern Seen begnüge ich mich mit der Angabe einzelner Werte, die ich gelegentlich der photometrischen Messungen erhalten habe.

See	Datum	Sichttiefe in m	Temperatur in Cels. oben	unten	Bemerkungen
Eibsee	Sept. 10. 1902	17,5	18,3	8,0	
Badersee	„ 10.	—	10,7	8,1	Die tiefste Stelle beträgt 8 m.
Achensee	„ 15.	11	14,7	13,1	
„	„ 16.	12,5	14,7	14,3	
„	„ 17.	12	14,4	13,3	
Königsee	„ 19.	10,5	14,2	9,0	
„	„ 20.	11	14,4	7,3	
„	Dez. 25.	15	Eisdecke		
Obersee	Sept. 20.	16,5	14,2	7,1	
Würmsee	April 27.	16,5	—	—	
„	Mai 8.	11	6,5	—	
„	Sept. 23.	4,5	15,9	15,8	
Staffelsee	„ 12.	5	18,7	18,5	Tiefste Stelle im nördl. See 37 m.
„	„ 24.	7,5	15,8	15,4	
Arbersee	„ 26.	6	10,9	8,5	Tiefste Stelle 16,5 m.
Gardasee	März 17.	19,8	—	—	

Aus dieser Zusammenstellung ersieht man ein wichtiges Resultat. Der Achensee ist ausgesprochen blau, hatte aber zur Zeit der Beobachtung nur eine Sichttiefe von 12 m, während der entschieden grüne Königsee eine grössere Durchsichtigkeit zeigte. Der Gardasee hat eine herrlich tiefblaue Farbe bei einer Sichttiefe von 19,8 m, während der Walchensee auch bei seiner grössten Durchsichtigkeit von 25 m grün ist. Nun stellte Abegg[1]) den Satz auf: „Je klarer das Wasser ist, um so blauer erscheint das aus dem See zurückkehrende Licht.“ Die angeführten Beispiele dürften den Satz widerlegen. Vielmehr kann man hiedurch wiederum das Resultat bestätigt finden, dass jeder See eine spezifische Eigenfarbe besitzt, die durch die Änderung der Durchsichtigkeit nur in ihrer Intensität beeinflusst wird.

Noch auf einen Umstand möchte ich hier aufmerksam machen: Wie ist es möglich, dass die beiden Seen mit so überaus grossem Absorptionskoeffizienten, nämlich Staffel- und Arbersee, doch dabei

[1]) Abegg a. a. O.

eine Sichttiefe aufweisen können, die der des Kochelsees z. B. mindestens gleichkommt, obwohl man vermuten sollte, dass einem grösseren Absorptionskoeffizienten auch eine grössere Undurchsichtigkeit entspricht? Vergleichen wir die beiden Absorptionskurven des Kochelsees vom 16. August und 5. September mit einander, so wird allerdings dieser letzte Schluss sich bestätigt finden. Vergleichen wir ferner zwei Seen mit annähernd gleicher Farbenzusammensetzung, wie z. B. Eibsee (Sichttiefe 17,5 m) und Walchensee (Sichttiefe 20,5 m), so bestätigt sich wieder das eben Gesagte. Wie ist nun die Abweichung von Staffel- und Arbersee zu erklären? Erinnern wir uns, dass diese beiden Seen braunes Wasser zeigen, die andern angeführten aber grünes, so werden wir der Lösung einen Schritt näher kommen. Ein kleiner Versuch dürfte die Sache klar machen. Ich stellte mir in zwei 40 cm hohen Zylindergläsern eine grüne und eine braune Wassersäule her, indem ich Wasser durch Methylenblau und Kaliumdichromat so färbte, dass die mittleren Absorptionskoeffizienten annähernd gleich waren. Auf den Boden eines jeden Glases brachte ich je ein gleich grosses Stück weissen Beinglases. Füllte ich nun beide Gläser so hoch mit dem gefärbten Wasser an, dass das Scheibchen am Boden des grünen Wassers gerade verschwand, so sah man es im braunen noch mit grosser Deutlichkeit, ja ich konnte in letzterem Glase die Wassersäule doppelt so hoch nehmen, ohne dass das Scheibchen unsichtbar wurde.

Hier liegt nun offenbar, wie so oft, ein rein physiologischer Grund vor. Wenn wir eine weisse Scheibe in einen hellgrünen See versenken, so werden wir mit dem Auge bald den Unterschied zwischen der Helligkeit der Scheibe und des umgebenden milchigen Wassers nicht mehr wahrnehmen können. Versenken wir sie aber in einen See mit dunkler, brauner Farbe, dann wird sich das Weiss der Scheibe verhältnismässig länger von dem dunklen Hintergrunde abheben und wir werden bei einem solchen See trotz der geringeren Lichtdurchlässigkeit seines Wassers doch eine ebenso grosse Sichttiefe erhalten können.

Zum Schlusse dieses Abschnittes möchte ich noch zwei auffallende Erscheinungen erwähnen.

1. Sieht man in einem See, der eine tiefdunkelgrüne oder blaue Eigenfarbe hat, mit dem Rohr ins Wasser, und bringt dabei das Auge nicht ganz dicht ans Rohr, so dass das Gesicht noch etwas

von der Sonne beschienen ist, dann sieht der Beobachter auf der Wasseroberfläche sein Bild reflektiert in schöner rosaroter Farbe. Wir haben hier einen Kontrast zwischen der dunklen Wasserfarbe und dem vom weissen Sonnenlicht beleuchteten Gesicht, der so gross ist, dass das reflektierte Bild beinahe die Komplementärfarbe des Wassers zeigt.

2. Bei Sichttiefenmessungen in einem klaren See, dessen Oberfläche ein klein wenig bewegt ist, kann es vorkommen, dass man über die Scheibe parallele Lichtstreifen und Schatten ziehen sieht. Sie sind gegen die Sonne hin gerichtet und entstehen durch die besonderen Reflexionen, die von einer jeden kleinen Welle ausgehen: das Phänomen der „fliegenden Schatten". Bei nur geringer Tiefe der Scheibe tritt das schöne Schauspiel auf, dass gleichsam feurige Schlangen über sie hinzuziehen scheinen.

IV. Abschnitt.

Temperatur und Farbe.

A. Allgemeine Temperaturverhältnisse in Seen.

Meine eigenen Temperaturmessungen bezweckten in erster Linie, nach Beziehungen zu suchen zwischen der Temperatur des Wassers, seiner Farbe und seiner Durchsichtigkeit. Sie vermehren aber auch zugleich die Kenntnisse über Wärmevorgänge in Seen und bestätigen die bereits gefundenen Tatsachen. (Siehe Tabelle S. 48.)

Der Messung vom 5. September gingen sehr viele warme Tage voran. Da sich die Temperatur der Oberflächenschicht in dieser Zeit nicht mehr merklich verändert hat, so scheint hier die maximale Erwärmung erreicht gewesen zu sein. Die Sprungschicht ist zwischen immer engere Grenzen zusammengedrängt worden, sie erhielt sich so mehrere Tage hindurch. Auf Tafel VII sind Temperaturkurven gezeichnet, welche die Entstehung der Sprungschicht, ihre Veränderung im Laufe des Sommers und ihr Verschwinden im Herbst an diesem See veranschaulichen sollen. Sie trat im Jahre 1902 demnach Mitte Juni auf und verschwand im Laufe des Oktober. Die Anordnung

Temperaturen des Kochelsees in Cels.-Graden.

Tiefe in m	19. V.	22. V.	2. VI.	14. VI.	15. VI.	16. VI.	28. VI.	29. VI.	30. VI.	27. VII.	16. VIII.	18. VIII.	22. VIII.	26. VIII.	28. VIII.	2. IX.	5. IX.	7. IX.	29. IX.	1. XI.	7. XII.	3. I.	1. II.	2 II.	20. III.
0	8,0	8	14.0	14,0	14,5	14.0	19,0	22.0	19,6	19.2	17.4	19.6	18,0	18.3	20.6	19.8	20.3	18,6	15,3	9.6	5.2	3.4	3.0	1.0	3.8
1	—	—	13.0	14,0	14,0	14.0	16.8	18.5	18,0	18.5	17.4	18.0	17,9	18.3	19.2	19.7	19.7	18,4	15,2	9.5	5.1	—	—	2.5	3.8
2	—	—	12,0	14,0	14.0	14,0	16.4	17.6	17.2	18,0	17.4	17.4	17.7	18.3	18,8	19.4	19.6	18.3	15,2	—	5.0	—	3.2	—	—
3	—	—	11.0	14.0	14,0	14,0	15.8	16.8	16.8	18.0	17,4	17,4	—	18.3	—	19,2	19.4	18.3	15,2	9,7	5.0	—	—	—	—
4	—	—	10.0	14,0	—	13.5	15.5	16,6	16,1	18.0	17,4	—	—	18.0	—	19.1	19,4	18,3	15,2	—		—	—	—	—
5	—	—	9.0	14,0	13.0	13,0	15.2	16.6	15,6	17.6	17.4	—	—	17.8	18.0	18.5	19.4	18,2	15.2	9,8	5.0	3.4	—	2.8	—
6	—	8	9.0	12.5	13.0	12.0	13,5	15.8	14,5	16.9	17.4	17.1	—	17.0	—	17,9	18,4	17.9	15.2	9.8		—	—	—	
7	6,5	—	9.0	10.5	11,0	11.2	12.8	13,6	13,0	16.6	16,8	17.0	16,5	16.5	—	17,7	17.7	17.2	15,2	—	—	—	—	—	—
8	—	—	8.0	10,0	10.2	10.7	10,5	10,8	11.5	15.4	16.2	16.6	16.0	16.1	16.6	16.9	17.2	16.7	15.2	—	—	—	—	—	—
9	—		8,0	9.0	9.7	9.2	10.0	9.8	10,7	10.8	14,3	13.6	14.7	15.0	14,7	15.2	15.8	15.9	14,4	—	—	—	—	—	—
10	—		8.0	8.7	9.0	8.7	—	9.0	9.3	9,1	10.9	12.1	12.5	13.2	12.8	13.3	12,9	13.1	13,4	9.8	5.2	—	3.5	3,0	3.8
11	—	—	8.0	—	—	—	—	—	9.0	8,4	10.2	10.3	10,6	10.2	10.8	11,8	11,2	12.8	11.3	—	—		—	—	—
12	—	—	8,0	8,2	8,2	8,2	—	7.8	8,5	8.3	9.3	9.5	10.0	9,8	9.3	9.3	10.2	10,2	10.2	9,4	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,0	—	—	—	—	—	9,3	9.1	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,2	—	—	—	—	—	—	8,3	—	—	—	—	—	—
15	—	—	6.5	7.0	6.7	7.5	—	7.0	7.5	7.8	7.8	7.8	7.8	8,0	7.9	8.0	8,5	8,3	7,9	8.9	5,2	—	—	—	—
16	—	—	6,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	—	6,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	6,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	5.7	5,7	—	6,3	6.3	6.8	6.8	7.1	7.0	6,8	7.0	6.9	7.0	7.0	6.7	6.6	5.0	—	4.0	3.0	—
25	—	—	—	—	5,0	5,0	—	—	5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,0	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	4,5	—	—	5.0	5.3	5,3	5.5	5.5	5,4	5,3	5.3	5.8	—	5,3	5.4	5.0	—		3.2	3.6
40	—	—	—	—	—	4,0	—	—	4,5	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,8	4,7	4,7	—	4,8	4.8	5,0	3,4	—	—	3,5

der graphischen Darstellung ist die übliche. Dabei sind die Seetiefen in der Horizontalen, die Temperaturen in der Vertikalen aufgetragen. Es kommt so der Sprung in der Temperatur besser zum Ausdruck.

Wie Richter bemerkt, ergeben sich im Winter oft sehr merkwürdige Resultate. Dies bestätigt sich auch hier. Nach langer, warmer Zeit war der See Ende Januar 1903 schnell gefroren und zwar sehr fest (Eisdicke 23 cm). Da nun das Eis als Wärmeschutz nach aussen dient, so ist es erklärlich, dass sich das Wasser direkt unter dem Eis auf $+3^0$ halten konnte. Eine Erwärmung infolge Bestrahlung durch das Eis hindurch dürfte ziemlich ausgeschlossen sein, da das Eis ebenso wie Wasser die Wärmestrahlen stark absorbiert.[1]) Die angegebene Temperatur wurde am 1. Februar gefunden an einer Stelle, an der ein grosses Loch ins Eis gesägt worden war. Am nächsten Tag zeigte das Wasser an demselben Platz (das Loch war über Nacht nicht zugefroren und Schneefall war eingetreten) nur mehr $+1^0$, da die gegen die nächtliche Ausstrahlung schützende Decke an dieser Stelle fehlte.

Temperaturen des Walchensees in Cels.-Graden.

Tiefe in m	19. V.	24. V.	15. VI.	16. VI.	29. VI.	19. VIII.	27. VIII.	1. IX.	3. IX.	29. IX.	8. XII.	5. I.	22. III.	18. V.
0	6	7,0	11,0	11,2	13,5	18,6	17,4	17,8	18,4	14,6	5,0	4,0	3,2	7,8
1	—	—	—	—	—	17,1	—	17,8	18,0	14,7	—	—	—	7,2
2	—	—	9,7	11,2	13,2	17,1	—	17,8	—	14,8	—	—	—	7,0
3	—	—	8,7	—	—	17,0	—	—	—	14,8	-	-	—	—
4	—	—	—	11,0	—	17,0	—	—	—	14,8	—	—	—	—
5	—	—	7,7	10,7	13,0	16,9	—	17,8	—	14,7	-	-	-	6,5
6	—	—	—	10,0	12,8	16,6	—	—	17,8	14,7	—	—	—	—
7	—	—		9,5	12,7	16,7	—	—	—	14,7	-	—	—	—
8	—	—	—	8,0	12,6	16,5	—	—	17,7	14,7	—	-		-
9	—	—	—	7,0	12,4	16,5	—	—	17,7	14,7	—	—	—	—
10	—	—	—	6,5	12,4	15,8	—	17,0	17,7	14,7	—	—	3,2	6.0
11	—	—	—	—	12,0	12,8	—	14,4	15,0	14,7	—	- -		—
12	—	—	—	—	9,0	10,5	16,8	12,0	12,4	14,7	—	—	—	—
13	—	—	—	—	8,2	9,9	12,0	10,5	11,0	13,9	—	—	---	
14	—	—	—	—	—	8,5	11,4	9,4	10,2	12,7	—	-		—
15	—	—	—	5,7	6,5	8,4	9,4	8,3	9,0	10,2	-			
16	—	6,0	—	—	—	—	—	—	8,3	—	-		—	—
17	—	5,5	—	—	—	—	—	—	7,7	—	—	—	-	
18	-	—	5,0	—	—	—	—	- -	—				-	

[1]) Tyndall, Gletscher der Alpen, Deutsche Ausgabe, 1898, p. 310.

Temperaturen des Walchensees in Cels.-Graden. (Fortsetzung.)

Tiefe in m	19. V.	24. V.	15. VI.	16. VI.	29. VI.	19. VIII.	27. VIII.	1. IX.	3. IX.	29. IX.	8. XII.	5. I.	22. III.	18. V.
19	5	—	—	5,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	5,8	6,9	7,0	6,6	7,6	6,8	—	—	—	5,0
25	—	—	—	—	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	5,0	5,1	—	—	5,4	5,3	—	—	—	4,3
40	—	—	—	—	4,5	4,7	—	—	4,7	5,0	4,9	—	3,2	4,0

Dieser tiefe und meist etwas bewegte See friert nur sehr selten zu; während der Kochelsee Ende Januar und im Februar 1903 sehr fest gefroren war, bildete sich auf dem Walchensee in dieser Zeit nur wenig Eis, das auch bald wieder verschwand. Aber in der Nacht vom 21. auf 22. März gefror er plötzlich ganz zu, obwohl nur ganz schwach, nachdem eine lange Periode von warmen sonnigen Tagen vorher gegangen war. Dabei betrug in der betreffenden Nacht bei ganz klarem Himmel die Lufttemperatur nur wenige Grade unter Null, gewiss eine charakteristische Erscheinung. Auf Tafel VIII habe ich den jährlichen Temperaturgang für diesen See nach der Methode der Isoplethen[1]) gezeichnet. Vertikal ist die Tiefe in Metern, horizontal die Zeit aufgetragen. Jede Kurve lässt nun für eine beliebige Zeit die Tiefe erkennen, in welcher die betreffende Temperatur angetroffen wurde. Überblickt man das ganze Diagramm, so sieht man im Juni infolge der starken Bestrahlung ein rasches Hinabsteigen der höheren Temperaturen, besonders in die Tiefe von ca. 10 m, eintreten. Um diese Zeit bildete sich die Sprungschicht aus. Dieselbe kommt im Diagramm dadurch zum Ausdruck, dass die Temperaturkurven in vertikaler Richtung dicht an einander gedrängt sind. Ihre schärfste Ausbildung hat sie, wie im Kochelsee, Ende August und anfangs September erreicht. Dann beginnt sich der See von oben her abzukühlen, während in der Tiefe die Wärme noch weiter vordringt. Anfangs Dezember ist schliesslich wieder ein ziemlicher Temperaturausgleich erreicht. Bei dieser Darstellungsweise sieht man sehr deutlich, wie eine grosse Wärmewelle während des Sommers in den See eindringt, wie tief sie wirkt und wie sie endlich wieder verschwindet.

[1]) Siehe auch b. Hann, Lehrb. d. Meteorologie.

An den übrigen Seen konnte ich nicht so zusammenhängende Temperaturbeobachtungen vornehmen. Ich machte solche nur gelegentlich der photometrischen Messungen; sie sind hier in einer einzigen Tabelle angegeben.

Tiefentemperaturen in Cels.-Graden.

Tiefe in m	Eibsee	Bader-see	Achensee			Königsee		Ober-see	Würm-see	Staffel-see	Arber-see
	am										
	10 IX.	10. IX.	15. IX.	16. IX.	17. IX.	19. IX.	20. IX.	20. IX.	23. IX.	12. IX.	26. IX.
0	18,3	10,7	14,7	14,7	14,4	14,2	14,4	14,2	15.9	18,7	10,9
1	18,0	—	14,7	14,4	14,4	14,2	14,3	13,7	15,8	18,7	10,2
2	17,9	—	14,7	14,4	—	14,2	14,2	13,7	15.5	18,7	10,2
3	17,9	8,7	14,7	14,4	—	14,2	14,0	13,7	15,8	—	10,0
4	17,8	—	14,6	14,4	—	13,5	13,8	13,7	15,7	—	10,0
5	17,7	—	14,6	14,4	—	12,7	13,5	12,3	15,8	18,5	9,5
6	17,7	—	14,6	14,4	—	11,5	10,6	11,4	15,8	—	8,5
7	17,5	8,1	14,6	14,4	—	11,0	9,3	10,3	15,8	18,0	7,1
8	15,0	8,1	14,5	14,4	14,4	10,7	8,8	9,4	15,8	17,5	6,0
9	13,4	Grund	14,3	14,4	—	10,2	8,0	9,2	15,8	16,3	5,3
10	11,8	tiefste	13,8	14,4	14,4	9,3	7,5	8,7	15,8	14,3	4.9
11	11,0	Stelle.	13,1	14,4	13,7	—	—	—	15,8	12,1	—
12	10,1		12,6	14,3	13,3	8,2	7,0	7,9	11,9	10,7	4,3
13	9,5		12,3	14,3	13,2	—	—	—	9,3	10,3	—
14	9,0		12,0	13,8	12,4	—	—	—	8,8	9,8	—
15	8,4		11,2	13,8	11,8	6,9	6,3	7,2	8,5	9,4	—
16	—		—	13,2	11,2	—	—	—	—	—	4,2
17	—		10,1	12,6	10,8	—	—	—	—	—	Grund
18	—		—	12,1	10,5	—	—	—	—	—	tiefste
19	—		—	10,1	—	—	—	—	—	—	Stelle.
20	7,1		9,2	9,4	9,2	5,7	5,2	6,7	7,1	8,6	
30	—		5,9	5,3	6,5?	4,3	4,2	5,6	5,7	—	
40	6,8		4,8	4,6	5,0?	4,2	4,2	5,0	5,1	7,7	
	am Grund b. 32 m.									am Grund b. 37 m.	

Beim Achensee wurden die Messungen nicht an derselben Stelle vorgenommen. Die Beobachtungsorte lagen zwar alle im nördlichen Teil des Sees, waren aber etwa je $^1/_2$ km von einander entfernt. Man sieht hier deutlich, wie verschieden die Temperaturen in gleichen Tiefen sind. Diese Erscheinung ist beim Achensee infolge seines

schmalen Beckens, das von allen Seiten Zuflüsse erhält, und dessen einzelne Teile verschieden lange von der Sonne beschienen werden, jedenfalls besonders auffallend. An den drei Messungstagen war kühles Wetter, ebenso einige Tage vorher, so dass die Temperaturumkehr im See schon eingetreten war. Die zwei mit Fragezeichen versehenen Werte sind unsicher, da hierbei das Schiff nicht mehr ruhig am Platz gehalten werden konnte.

Beim Königsee gelten dieselben allgemeinen Bemerkungen.

Vom Würmsee hat Ule in seinem Werke „Der Würmsee" zahlreiche Temperaturmessungen angegeben.

B. Temperatur, Farbe und Durchsichtigkeit in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit.

Die Tatsache, dass alle Seen im Winter dunklere Farbe zeigen als im Sommer, legte die Vermutung nahe, dass die Temperatur auf die Wasserfarbe einen gewissen Einfluss haben könnte. Wallmann[1]) nennt die erwähnte Erscheinung direkt eine Änderung der Farbe, wenn er damit offenbar auch nur den Wechsel der Intensität meint. Wild[2]) prüfte die Frage experimentell, indem er die Intensität des aus einer mit Wasser gefüllten Röhre austretenden Lichtes verglich mit der Helligkeit der ursprünglichen Lichtquelle. Dabei fand er wirklich eine Zunahme der Absorption mit wachsender Temperatur. Jedoch sind die Variationen so gering, dass sie für das Auge nicht in Betracht kommen können. Zudem operierte Wild mit Temperaturdifferenzen (Wasser von 7° und von 50°), die in der Natur nie auftreten.

Man könnte auch vermuten, dass an der Sprungschicht, wo die Temperaturgradienten rasch auf einander folgen, irgendwelche Unregelmässigkeiten in der Reflexion, Brechung oder Absorption auftreten könnten, die von Einfluss auf die Farbe sind. Da ferner der Brechungsexponent des Wassers sich mit der Temperatur ändert, so wäre es möglich, dass beim Auftreten von Schlieren ähnliche Erscheinungen vorkommen, wie sie erhalten werden, wenn man Glaspulver in eine Mischung von Benzol und Schwefelkohlenstoff bringt.[3]) Man kann nämlich aus den beiden Flüssigkeiten eine solche

[1]) Wallmann a. a. O.

[2]) Wild, Pogg. Ann. 134, 1868, p. 582.

[3]) Christiansen, Wied. Ann. 23, 1884, p. 300.

Mischung herstellen, dass ihr Brechungsverhältnis für eine beliebige Wellenlänge genau gleich dem des Glases ist. Licht von solcher Wellenlänge geht dann ohne Reflexion oder Brechung durch die Mischung von Flüssigkeit und Pulver hindurch, während die anderen Farben teils zurückgeworfen, teils gebrochen werden. Die ganze Masse erscheint also gefärbt. Unterscheidet sich aber das Brechungsverhältnis der Mischung nur um wenig von dem des Glases, so kann das Licht nicht ungehindert durch das Pulver hindurchgehen. Es treten vielfache Reflexionen und Brechungen ein und die Flüssigkeit wird getrübt sein. Dass solche Erscheinungen bei der Vermengung von Wasserschichten verschiedener Temperatur auch vorkommen können, ist sehr wahrscheinlich. Aber hier interessiert nur die Frage, ob sie auch von solcher Intensität sind, dass sie die Durchsichtigkeit eines Sees zu beeinflussen imstande sind. Sehen wir uns daher die Lage der Sprungschicht in den Seen etwas näher an.

Bei trüben Seen, wie beim Kochelsee, wo die Sprungschicht bei 7 bis 8 m beginnt, liegt sie schon unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze der weissen Scheibe, kann also zu der Farbe des Wassers nichts mehr beitragen. In klaren Seen, wie beim Walchensee, wo sie etwa bei 10 m Tiefe beginnt, liegt sie ihrer ganzen Ausdehnung nach allerdings noch innerhalb des Sehbereichs. Direkte photometrische Messungen in dieser Tiefe vorzunehmen ist nicht gut möglich, da die Scheibe dann riesige Dimensionen haben müsste, um noch den ganzen Strahlenkegel im Photometer erfüllen zu können. Auch wäre dort unten die Lichtstärke für Messungen schon zu gering. Wohl aber verfolgte ich beim Versenken die Scheibe mit dem Auge, konnte aber beim Passieren der Sprungschicht nie auch nur den geringsten Unterschied in der Farbe gegen andere Tiefen wahrnehmen. Man könnte nun einwenden, dass durch die Bewegung der Scheibe die Sprungschicht überhaupt zerstört würde, doch konnte ich mit dem Thermometer konstatieren, dass eine Vermischung der verschiedenen Wärmezonen bei vorsichtigem Hinablassen nicht eintritt, ein Umstand, auf den auch Ule aufmerksam macht. Dies beweist nebenbei, dass der Zustand, der dort unten herrscht, sehr stabil sein muss, wodurch auch verständlich wird, dass sich derselbe viele Tage hindurch fast unverändert erhalten kann.

Wir können also sagen, dass bei den von mir untersuchten Seen ein Einfluss der Temperatur auf die Farbe nicht nachweisbar ist.

Umgekehrt hat aber die Farbe gar wohl einen Einfluss auf die Temperatur eines Sees insofern, als Wasser die roten Strahlen stärker absorbiert als die andern.

Dass auch die Sichttiefe die Temperaturverhältnisse in einem See beeinflusst, ist einleuchtend, denn klares Wasser lässt die Sonnenstrahlen tiefer eindringen als trübes; während also ein klarer Gebirgssee in seinen oberen Schichten sich nur langsam erwärmen wird, da die eindringende Wärmemenge sich auf einen grösseren Bereich der Tiefe nach verteilt, werden die Oberflächenschichten in einem undurchsichtigeren See schneller erwärmt werden. In den tiefer gelegenen Regionen herrschen dann allerdings noch niedrere Temperaturen vor.

Man wird also aus der Absorptions- und Sichttiefenkurve eines Sees direkt auf seine thermischen Verhältnisse schliessen können.

Um schliesslich noch den Einfluss der Temperatur auf die Durchsichtigkeit der Seen zu untersuchen, gehen wir aus von den Erscheinungen, die sich beim reinen Wasser darbieten. Massgebend sind in dieser Beziehung die Untersuchungen von Spring[1]) über thermische Konvektionsströme im Wasser. Er brachte optisch leeres Wasser in eine Röhre von 52 m Länge. Dabei konnte man immer noch durch die Röhre hindurch die Öffnung an der entgegengesetzten Seite als kreisrund erkennen. Wurde aber das thermische Gleichgewicht an einer Stelle nur im geringsten gestört, so trat vollständige Dunkelheit auf, da das Licht infolge von Schlierenbildung nicht mehr ins Auge gelangen konnte. Für eine Röhre von 26 m Länge konnte Spring feststellen, dass ein Temperaturunterschied von 0,6° genügt, um vollständige Undurchsichtigkeit zu erzeugen.

Anders stehen die Verhältnisse bei nicht optisch leerem Wasser. Ich füllte in die schon mehrfach erwähnte 5 1/2 m lange Röhre gewöhnliches destilliertes Wasser. Die Helligkeit des durchgelassenen Lichtes wurde photometrisch mit der ursprünglichen Lichtquelle verglichen. An beiden Enden wurde je ein Thermometer eingetaucht. Eine Erwärmung der Röhre mit der Hand veränderte nichts an der Durchsichtigkeit. Erst bei Erwärmung einer Stelle des Rohres mit einer Gasflamme trat Undurchsichtigkeit ein, die aber nach Entfernung der Wärmequelle schnell wieder der früheren Helligkeit Platz machte, obwohl noch grosse Temperaturunterschiede an beiden

[1]) Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. XXXI, 1896, p. 94.

Enden der Röhre bestanden. Man erkennt aus diesem Versuch, dass im gewöhnlichen Wasser, das nicht optisch leer ist, sehr wohl grosse Temperaturunterschiede neben einander bestehen können, ohne dass hiedurch die Durchsichtigkeit vermindert wird, wenn dieselben nur stationär sind, d. h. wenn keine Konvektionsströme auftreten.

Nun haben wir aber gesehen, dass in einem See während des Sommers die Schichten verschiedener Temperatur sehr ruhig übereinander liegen, weshalb keine oder nur sehr geringe Konvektionsströme auftreten, so dass die Durchsichtigkeit dadurch nicht beeinträchtigt wird. Tatsächlich habe ich auch bei meinen zahlreichen Sichttiefenbestimmungen während des Sommers selbst bei Durchquerung einer sehr ausgeprägten Sprungschicht niemals eine plötzliche Trübung oder eine plötzliche Verminderung der Helligkeit der Scheibe wahrnehmen können.

Anders stehen die Verhältnisse bei der Abkühlung der Seen. Infolge Untersinkens des schwereren kalten Wassers treten lebhafte Zirkulationen der Temperatur auf. Wiederum werden hiedurch die Sichttiefen trüber Seen verhältnismässig weniger beeinflusst werden als die klarer Seen. So konnte ich eine solche plötzliche Abnahme der Helligkeit der Scheibe im Walchensee in der Tiefe der Sprungschicht (bei 14 bis 15 m) am 29. September 1902 feststellen, ein Umstand, der auch in der Sichttiefe zum Ausdruck kam.

Wenn es richtig wäre, dass durch Konvektionsströme im Sommer die Sichttiefe stark vermindert wird, so müsste dieselbe auch innerhalb eines Tages grossen Schwankungen ausgesetzt sein. Nehmen wir an, an einem sonnigen heissen Tag sei der See stark erwärmt worden, so müsste infolge der eintretenden thermischen Bewegung seine Durchsichtigkeit sich sehr vermindert haben. Folgt nun eine warme Nacht darauf, in der der Himmel bedeckt ist, so dass die Ausstrahlung gering ist, so würden sich die Schichten verschiedener Temperaturen im See in einer gewissen Weise einstellen können und man hätte am Morgen eine bedeutend grössere Sichttiefe zu erwarten, was aber den Beobachtungen nicht entspricht.

Wir können also sagen: die thermischen Störungen beeinflussen die Durchsichtigkeit in einem trüben See überhaupt so wenig, dass sie nicht in Betracht kommen, während sie in klaren Seen allerdings wenigstens im Herbst bei der Abkühlung einige Wirkung auf die Sichttiefe auszuüben vermögen.

V. Abschnitt.

Prüfung der Theorien der Wasserfarbe.

Wir haben schon in der Einleitung gesehen, dass es zwei Theorien gibt, welche die Wasserfarbe zu erklären suchen, eine physikalische (Diffraktionstheorie), welche behauptet, die Wasserfarbe könne teilweise als Farbe trüber Medien aufgefasst werden, und eine rein chemische, welche die Farbe als Eigenfarbe deutet.

Wir wollen uns zuerst mit der physikalischen Theorie beschäftigen.

1. Diffraktionstheorie.

Durch kleine Teilchen, die klein sind im Verhältnis zur Lichtwellenlänge, wird nach der Rayleigh'schen Theorie das auffallende Licht diffundiert. Es ist dann polarisiert und das Maximum der Polarisation tritt auf senkrecht zum einfallenden Strahl. Wie schon in der Einleitung erwähnt, fanden Soret und Hagenbach dieselben Polarisationsverhältnisse auch bei dem Licht, das aus dem Wasser austritt. Die Erscheinung ist nach ihrer Angabe und wie ich mich selbst überzeugt habe, allerdings nur schwach, etwa so „wie bei mässig blauem Himmel". Damit man die Polarisation überhaupt wahrnehmen kann, müssen die Sonnenstrahlen direkt auf die Wasseroberfläche fallen. Auch muss die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser eben sein, damit die eindringenden Strahlen parallel bleiben. Taucht man nun das Soret'sche Rohr, dessen „Objektiv" aus einer wasserdicht anliegenden Glasplatte, dessen „Okular" aus einem Nikol'schen Prisma oder besser einer Haidinger'schen Lupe besteht, schief ins Wasser ein, so sieht man, wenn das Wasser klar ist, eine schwache Polarisation, deren Ebene durch die Achse des Rohres und durch die Sonne geht. Ich konnte aber bei den von mir untersuchten Gewässern in der Richtung senkrecht zum einfallenden Strahl kein Maximum konstatieren, vielmehr fand ich die Polarisation auch in Richtung des einfallenden Strahles gleich gross. Beim Arbersee war sogar in letzterer Richtung ein Maximum, wobei das Licht seine Schwingung in der Einfallsebene ausführte. Die Verhältnisse scheinen also, nach Sorets und meinen Beobachtungen zu schliessen, folgendermassen zu liegen: in sehr klarem Wasser, wie dem des Genfersees, ist das

austretende Licht fast ausschliesslich infolge von Diffusion an den sehr kleinen suspendierten Teilchen polarisiert. Bei trüberen Gewässern kommt noch Polarisation durch Reflexion an grösseren Teilchen hinzu, weshalb kein Maximum mehr in Richtung senkrecht zum einfallenden Strahl zu konstatieren ist. In den schwarzen Seen scheint ausschliesslich, oder wenigstens in sehr überwiegendem Masse, die Lallemand'sche Erscheinung aufzutreten, dass nämlich das Licht in der Einfallsebene schwingt, wobei ein Maximum in Richtung des einfallenden Strahles vorhanden ist. Ich glaube auf Grund meiner Beobachtungen sagen zu dürfen, dass durch das Vorhandensein dieser schwachen Polarisationserscheinungen die Auffassung der Wasserfarbe als der eines trüben Mediums noch nicht genügend gerechtfertigt erscheint, zudem die Resultate meiner weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiete das Gegenteil zeigen, denn

1. konnte ich durch photometrische Messungen konstatieren, dass destilliertes Wasser, das noch mit suspendierten Staubpartikelchen erfüllt ist, auch im durchgelassenen Licht eine vollkommen blaue Farbe hat (s. Kurve auf Tafel I), dass hiebei kein merklicher Verlust an kurzwelligen Strahlen auftritt, wie es bei einem trüben Medium im durchgelassenen Licht sein müsste.

2. Ferner beweisen die Absorptionskurven des Kochelsees, die bei verschiedenen Sichttiefen aufgenommen wurden, dass mit einer Trübung keine Änderung der Farbenzusammensetzung verbunden ist.

3. Auch behandelte ich Kochelseewasser mit einer Lösung von Zinkchlorid, wodurch die suspendierten Teilchen zu Boden geschlagen werden. Nach einem Monate untersuchte ich dieses nunmehr optisch leere Wasser auf seine Farbe und fand dieselbe unverändert, während sie, wenn die kleinen Teilchen einen Einfluss gehabt hätten, im durchgelassenen Licht ärmer an Rot und reicher an Blau hätte werden müssen.

4. Nach der Rayleigh'schen Theorie wird Licht zerstreut durch Teilchen, die sehr klein sind im Vergleich zu den Lichtwellenlängen. Das Amplitudenverhältnis der Schwingungen des zerstreuten Lichtes ändert sich umgekehrt mit dem Quadrat der Wellenlänge und das Verhältnis der Intensität der Strahlen selbst daher mit der vierten Potenz. Bedeutet J_0 die Intensität des einfallenden Lichtes, J_1 die des reflektierten, so erhält man

$$\frac{J_1}{J_0} = \frac{k}{\lambda^4}$$

wo ein Faktor ist, der von der Grösse und Anzahl der Teilchen abhängt; dringt das Licht eine Strecke x in das trübe Medium ein, so ist

$$J_1 = J_0 e^{-k\lambda^{-4}x}$$

Darnach würde z. B. das Rot von der Wellenlänge $\lambda_1 = 650\ \mu\mu$ gegenüber dem Blau der Wellenlänge $\lambda_2 = 450\ \mu\mu$ im Verhältnis

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^4 = 1{,}44^4 : 1 = 4{,}30 : 1$$

schwächer reflektiert werden. Im durchgelassenen Licht jedoch wird das Rot viel stärker vorhanden sein als das Blau.

Um dieses experimentell zu untersuchen, stellte ich mir optisch leeres Wasser und dann ein trübes Medium her. Letzteres erhält man leicht durch eine alkoholische Mastixlösung, die dem zu untersuchenden Wasser beigemengt wird. Um die Teilchen recht klein zu erhalten, muss man nach Abney und Festing[1]) kleine Quantitäten der Lösung in grosse Mengen von Wasser einschütten und dabei fortwährend umrühren oder schütteln.

Ich brachte nun diese Mastixlösung in das optisch leere Wasser, so dass der Gehalt an gelöstem Mastixpulver etwa 5 mg in 12 l Wasser betrug. Dieses Gemisch liess ich über Nacht stehen und bekam dann für die Farbe des durchgelassenen Lichtes folgende Werte:

Optisch leeres Wasser, das mit etwas Mastixlösung getrübt ist.

(Kurve s. Tafel IX.)

λ	A	
658	0,386	
643	0,365	
617	0,351	
602	0,333	
590	0,249	$d = 5{,}55$ m.
579	0,220	
558	0,237	
522	0,290	
494	0,330	
473	0,365	

[1]) Abney und Festing, Beibl. X, p. 622.

Der Zweck der ganzen Untersuchung ist nun der, zu prüfen, ob die Absorption eines künstlich getrübten Wassers mit der eines natürlichen Wassers übereinstimmt, ob also die Farbe des Wassers ganz oder teilweise als Farbe eines trüben Mediums aufgefasst werden darf. Vergleichen wir daher die zuletzt gewonnene Kurve mit denen auf Tafel I. Da bemerken wir vor allem, dass beim trüben Medium schon bei einem geringen Grad von Trübung (die sich durch die absolute Grösse des Absorptionskoeffizienten ausdrückt) eine grosse Abschwächung der Absorption im Rot auftritt, während die im Blau sehr stark zunimmt, eine Erscheinung, die in dem Grade bei keinem Wasser in der Natur vorkommt; denn bei allen den Seen, bei denen eine mässige Absorption im Blau vorhanden ist, ist doch die Absorption im Rot immer viel grösser, sie wächst ungefähr proportional mit der Trübung. Erst bei den gelben Seen schwächt sie sich etwas ab. Da nun schon die Farbe des mit reinem Wasser hergestellten trüben Mediums mit keiner Wasserfarbe übereinstimmt, so würden sich noch viel grössere Abweichungen ergeben, wenn das Wasser selbst noch Trübung aufweisen würde und sich ausserdem noch eine grüne oder gelbe Eigenfarbe hinzugesellte, denn dann wird das Rot verhältnismässig nur gering absorbiert, das Blau dagegen in einem solchen Masse, dass diese Kurven nimmermehr als Absorptionskurven des Wassers gedeutet werden könnten.

Wir müssen also zu dem Resultat gelangen, dass die Wasserfarbe keinesfalls als die Farbe eines trüben Mediums aufgefasst werden kann.

2. Chemische Theorie.

Ich habe früher erwähnt, dass alle Abweichungen der Wasserfarbe vom Blau auf Fremdkörper zurückzuführen sind. Wir können dies nun genauer präzisieren, indem wir sagen: es sind einzig und allein Lösungen verschiedener Substanzen, die, dem Wasser auf irgend einem Wege zugeführt, ihm seine spezifische Farbe verleihen.

Welche Bestandteile sind es denn, die dem Wasser seine verschiedenen Farben zu erteilen imstande sind? Da liegt es nun sehr nahe, dass man als solche die am häufigsten und in grössten Mengen vorkommenden Substanzen vermutet. Diese sind aber 1. Kalk in seinen verschiedenen Arten, als Dolomit, kohlensaurer und schwefel-

saurer Kalk, und 2. organische, humöse Stoffe. Um diese Vermutungen auf ihre Richtigkeit zu prüfen, habe ich zwei Versuche angestellt. Einmal vermischte ich reines Wasser[1]) mit Kalciumhydroxyd, so dass etwa 1 g in 12 l Wasser (ca. 84 mg auf 100 g Wasser) gelöst war. Für die Farbe erhielt ich die in folgender Tabelle angegebenen Werte:

Kalk in Wasser gelöst.

A bedeuten die Werte für doppelt destilliertes Wasser.
A' bedeuten die Werte für das Kalkwasser.

λ	A	A'	
658	0,320	0,390	
643	0,291	0,353	
622	0,239	0,322	
617	0,244	0,327	
602	0,173	0,266	
590	0,089	0,176	$d = 5{,}55$ m.
579	0.049	0,131	
558	0,038	0,126	
522	0,002	0,112	
494	0,002	0,108	
473	—	0,098	
458	—	0,103	

Eine andere Wasserfarbe erhielt ich, indem ich Wasser über 250 g frischer Gartenerde filtrierte:

Organische Stoffe in Wasser gelöst.

A bedeuten die Werte für doppelt destilliertes Wasser.
A' bedeuten die Werte für die Lösung.

λ	A	A'	
658	0,320	0,660	
643	0,291	0,617	
628	—	0,607	
617	0,244	0,615	
602	0,173	0,576	$d = 5{,}55$ m.
590	0,089	0,509	
579	0,049	0,481	
558	0,038	0,503	
540	—	0,536	
522	0,002	0,565	

[1]) Nachdem ich festgestellt hatte, dass sich das optisch leere Wasser vom doppelt destillierten nach Farbe und Durchsichtigkeit nicht merkbar unterscheidet, brauchte ich zu den weiteren Untersuchungen nicht mehr optisch leeres Wasser herzustellen, was natürlich eine grosse Zeitersparnis bedeutet.

Die Kurven auf Tafel X lassen die Farbenzusammensetzung dieser beiden Lösungen erkennen. Beim Vergleich mit den Kurven auf Tafel I sieht man, dass es ausgesprochene Wasserfarbenkurven sind. Ferner kann man aus der Kurve für das Kalkwasser entnehmen, dass dieses eine grünliche Farbe hat, da schon etwas Absorption im Blau auftritt. Die andere Kurve zeigt, dass wir es hier mit einem gelblichen oder bräunlichen Wasser zu tun haben, dessen Farbe zwischen der des Staffelsees und Arbersees liegt.

Wir erhalten also daraus das Resultat, dass grosser Kalkgehalt dem Wasser einen grünen Ton verleiht, während grössere Mengen von gelösten organischen Bestandteilen die Farbe über Grün nach Gelb führen. Wir wollen nun an der Hand einiger chemischer Analysen untersuchen, ob dieses Resultat auf die von mir auf ihre Farbe untersuchten Seen Anwendung finden kann. Ich gebe zuerst in einer Tabelle den Gehalt an Kalk und an organischen Bestandteilen für einige Seen an.

In 1000 g Wasser sind in mg enthalten:

Seen	CaO	Org.
Walchensee [1]) . . .	50,5	14,55
Kochelsee [1])	80,4	22,78
Würmsee [2])	49,8	23,86
Genfersee [3])	58,95	13,80

Wir ersehen zunächst hieraus, dass alle vier Seen einen grossen Gehalt an Kalk besitzen. Ferner haben wir besonders bei Kochel- und Würmsee noch einen sehr grossen Reichtum an organischen Substanzen. Die Kurven des Kochel- und Würmsees zeigen uns daher schon eine grössere Absorption im Blau, die Farbe neigt sich also einem geblichen Grün zu, während der Walchensee noch viel mehr Blau besitzt. In Ermangelung einer Analyse des Achensees habe ich eine solche des Genfersees hier beigefügt, der ja auch blaues Wasser hat. Dabei muss ich vorausschicken, dass die Wasserproben für die Analyse aus den ersten drei Seen zur Zeit ihrer grössten Durchsichtigkeit im Februar und März geschöpft wurden, während die des Genfersees aus dem Monat Juli stammt, also aus der Zeit der grössten Verunreinigung des Sees. Trotzdem fällt der

[1]) Schwager a. a. O.

[2]) Gebbing, Hydrochem. Untersuch. des Würm-, Kochel- und Walchensees, München 1902.

[3]) Forel, Léman, 2. Bd. Analyse von R. Brandenburg.

sehr geringe Gehalt an organischen Bestandteilen auf. Man darf also annehmen, dass die blauen Gewässer auch am wenigsten gelöste Substanzen enthalten. Bezüglich der Analysen von gelbem und braunem Wasser nehme ich die Angabe Reindls[1]) zu Hilfe. Er behandelt in seiner Arbeit die schwarzen Gewässer Südamerikas, die in der Farbe unseren bayerischen Waldseen sehr nahe stehen. Immer wird von Reindl der überaus grosse Reichtum an organischen Bestandteilen hervorgehoben. Er betont auch, dass gerade dieser die schwarze Färbung verursacht. Betreffs der Löslichkeit der humussauren Stoffe bestehen Meinungsverschiedenheiten; man fragt sich nämlich, ob diese sich unter Einwirkung von kohlensauren Alkalien in Wasser lösen oder ob es eine einfache Lösung ist. Schwager behauptet letzteres, während Reindl die ältere Ansicht der vermittelten Lösung vertritt. Er beschreibt dabei auf S. 124 ff. einige Versuche, wodurch er seine Behauptung zu beweisen sucht. Eine auffallende Tatsache ist allerdings die, dass braunes Wasser beim Übertritt auf kalkreicheren Boden sich meist schnell entfärbt, d. h. das Kalcium verdrängt dann die Alkalien und es entstehen schwer lösliche humussaure Kalciumverbindungen. Schwager hingegen betont ausdrücklich, dass gerade in den Gewässern des bayerischen Waldes kein kohlensaures Alkali aufzufinden war. Wenn ich mir hierüber ein Urteil erlauben darf, so möchte ich die Ansicht aussprechen, dass zur Braunfärbung in dem Masse, wie sie die natürlichen Gewässer besitzen, wohl schon die freie Lösung ausreicht; denn bei der Herstellung meines oben erwähnten braunen Wassers löste sich ein Teil der Gartenerde in Wasser allein; durch Zusatz von kohlensaurem Alkali kann die Löslichkeit bedeutend vergrössert werden, so dass man auch schon in kleinen Quantitäten die „schwarze" Farbe deutlich wahrnehmen kann, wie aus den angegebenen Versuchen Reindls hervorgeht.

Ausser den organischen Bestandteilen hat auch wohl das kohlensaure Eisenoxydul[2]) eine Wirkung auf die Färbung und Entfärbung mancher Gewässer.

Werfen wir noch kurz einen Blick auf die verschiedenen Seenkurven auf Tafel V. Als besondere Eigentümlichkeit für das reine

[1]) Reindl a. a. O.

[2]) Spring, Bull. Acad. Roy. Belg., 36, 1898.

Wasser haben wir (s. S. 27) dreierlei erkannt: 1. die grosse Absorption im Rot, 2. den charakteristischen Absorptionsstreifen im Orange, 3. die grosse Lichtdurchlässigkeit für das Blau. Im ganzen treten dieselben Erscheinungen auch bei allen stark kalkhaltigen Gewässern mit mehr oder weniger grosser Änderung im blauen Teil auf. Wir sehen dann, dass der Achensee genau die Farbenzusammensetzung des reinen Wassers zeigt, also jedenfalls nur sehr wenig gelöste Bestandteile enthält. Ferner erkennen wir, wie mit steigendem Gehalt an organischen Stoffen die Absorption im Blau wächst.

So kann man also in der Farbe deutlich den chemischen Gehalt des Wassers verfolgen, nachdem man nur erst einmal die Einwirkung der beiden wichtigsten Substanzen auf den Verlauf der Absorptionskurve erkannt hat.

Welche Substanz nun gerade ein See in überwiegendem Masse gelöst enthält, das entscheidet die geologische Beschaffenheit seines Beckens oder die seines Niederschlagsgebietes. Wir sehen, dass die tiefgrünen Gewässer hauptsächlich auf reinem Kalkboden vorkommen; viele Vorlandseen, wie Kochelsee, Würmsee, Ammersee, Chiemsee, liegen wohl auch noch im Kalkgebiete, grenzen aber doch grossenteils an moosige Gegenden, oder haben Zuflüsse, die aus solchen kommen. Daher ist ihre Farbe ein gelbliches Grün; überhaupt enthalten sie auch infolge der Nähe von Mooren viel mehr trübende schwimmende Teilchen, die zum Teil mit blossem Auge sichtbar sind. Daher ist in diesen Seen die Sichttiefe geringer als in den klaren Gebirgsseen. Die gelben oder braunen Gewässer endlich treffen wir in solchen Gegenden, wo grosse verwesende Pflanzenmassen vorkommen. Sie sind also entweder ausgesprochene Moorwässer (Staffelsee), oder aber ihre Umgebung und ihr Zuflussgebiet ist reich an Verwitterungsprodukten, so dass sich grosse Mengen von Humus bilden können, wie dies im Urgebirge (Bayerischer Wald, Fichtelgebirge, Schwarzwald) so auffallend zutage tritt.

Wir können also jetzt am Schluss unserer Betrachtung feststellen, dass die Farbe eines jeden Sees und auch die jedes anderen Gewässers eine Eigenfarbe ist, die ihre Ursache hat zunächst in der Eigenfarbe des reinen Wassers, welche dann modifiziert wird durch den chemischen Gehalt, der seinerseits wiederum abhängt von den geologi-

schen Verhältnissen der nächsten und weiteren Umgebung. Aber nicht nur die Farbe des Sees hängt von der geologischen Bodenbeschaffenheit ab, sondern in hohem Masse auch die Vegetation, die den See umgibt. Nun haben wir gesehen, dass gerade auch diese Vegetation wieder einen grossen Einfluss hat auf die Durchsichtigkeitsverhältnisse des Wassers. Ferner sind aber Farbe und Durchsichtigkeit die beiden Faktoren, welche die Temperaturverhältnisse regeln; durch diese endlich ist das organische Leben im See, die Pflanzen- und Tierwelt, bedingt.

Auf Grund dieser Resultate ist es naheliegend, eine neue Einteilung der Seen zu treffen, bezüglich ihrer Farbe, und zwar nach dem Merkmal, das uns bei unseren Betrachtungen am meisten beschäftigt hat, nämlich nach der Grösse der Absorption, welche das betreffende Wasser auf die blauen Strahlen ausübt. Wir können demnach vier Gruppen unterscheiden:

I. Gruppe: Blau wird nicht absorbiert, Farbe: blau. (Typus Achensee.)

II. Gruppe: Blau wird schwach absorbiert, Farbe: grün. (Typus Walchensee.)

III. Gruppe: Blau wird stark absorbiert, Farbe: gelblich grün. (Typus Kochelsee.)

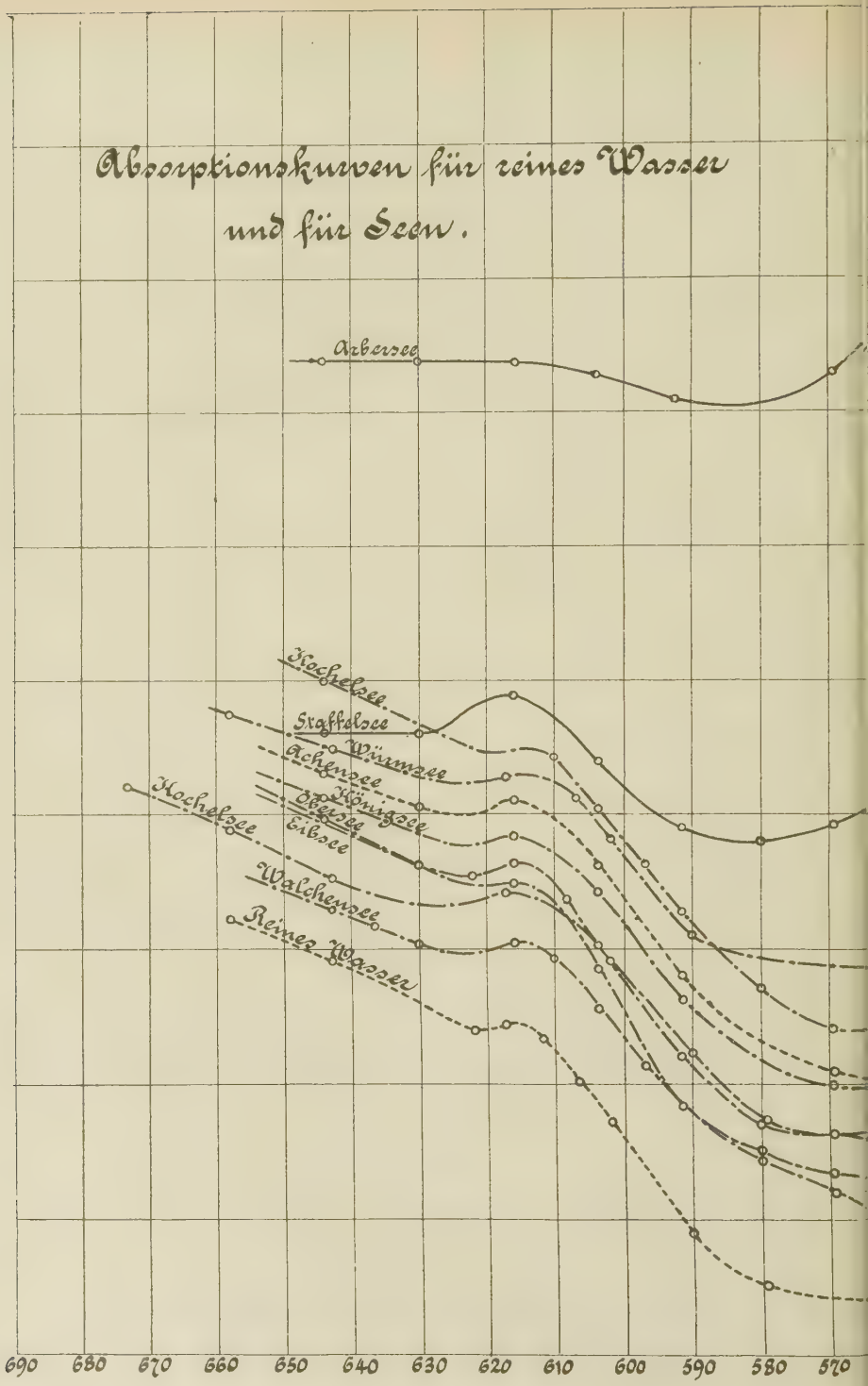
IV. Gruppe: Blau wird vollständig absorbiert, Farbe: gelb oder braun. (Typus Staffelsee.)

Wie auf S. 39 erwähnt, kann man diese Unterschiede entweder schon mit blossem Auge, ganz sicher aber mit Hilfe eines Taschenspektroskops feststellen.

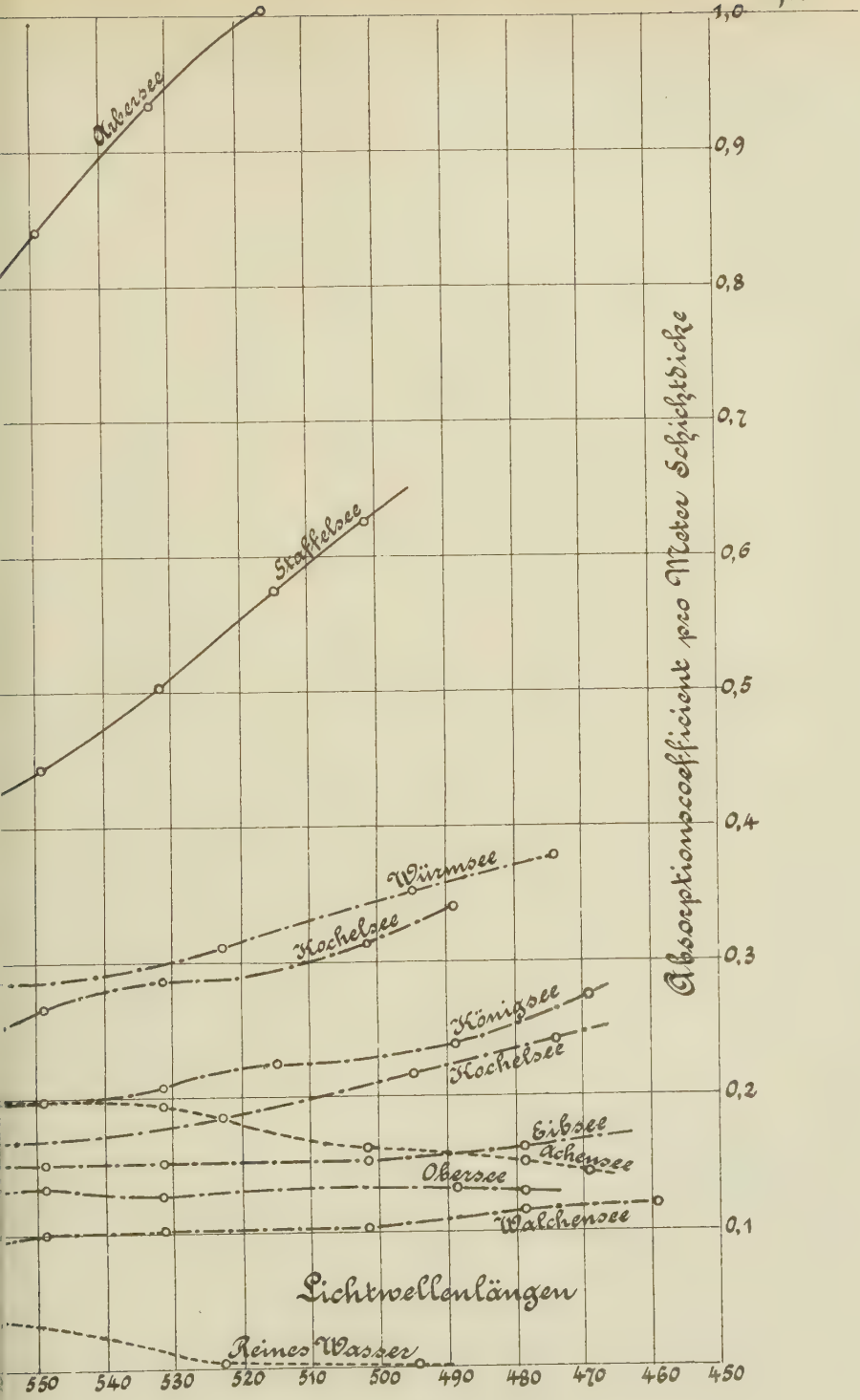
Zum Schlusse möchte ich mir erlauben, Herrn Professor Dr. Ebert für die vielseitigen Anregungen und freundlichen Unterstützungen bei der vorliegenden Arbeit meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

München.
Physikalisches Institut der technischen Hochschule 1903.

Absorptionskurven für reines Wasser und für Seen.

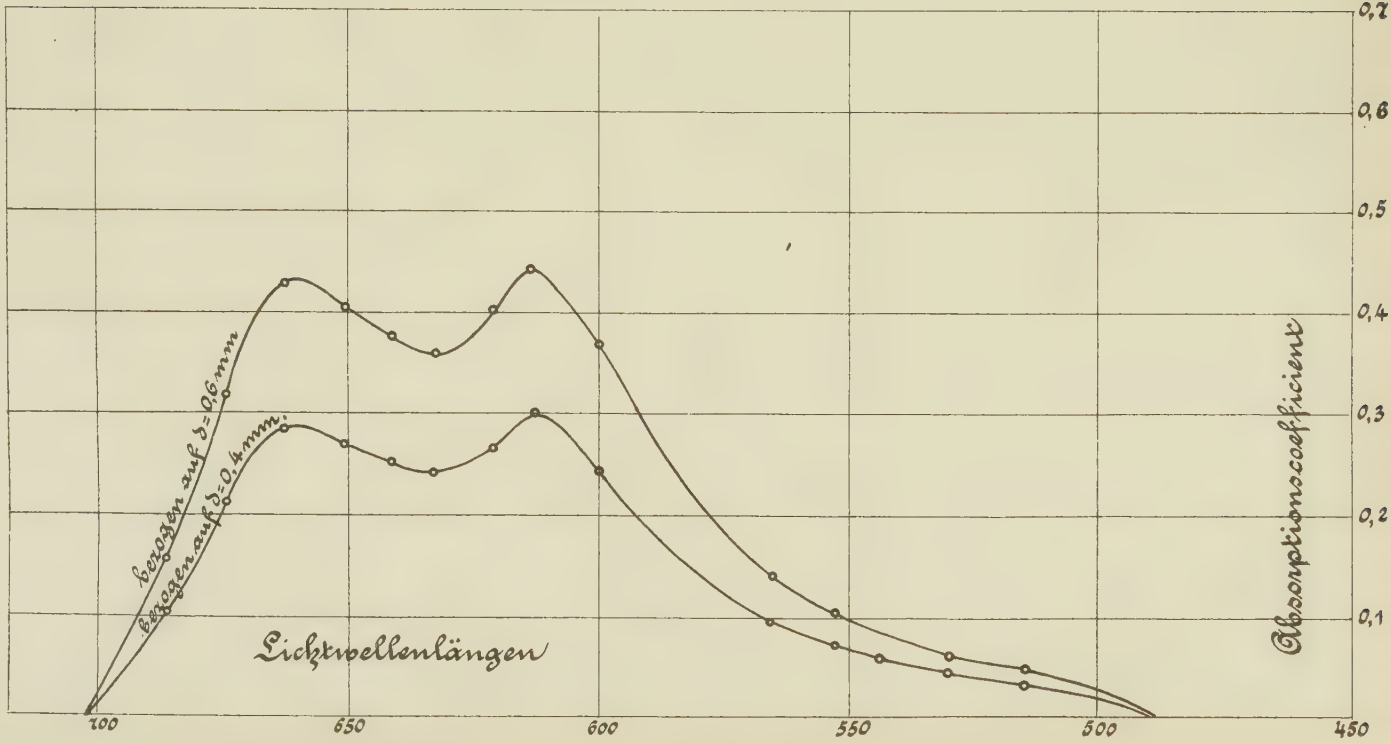


Taf. 1.


Absorptionscoefficient pro Meter Schichtdicke
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
Achensee
Staffelsee
Würmsee
Kochelsee
Königsee
Kochelsee
Eibsee
Achensee
Obersee
Walchensee
Lichtwellenlängen
Reines Wasser
550
540
530
520
510
500
490
480
470
460
450

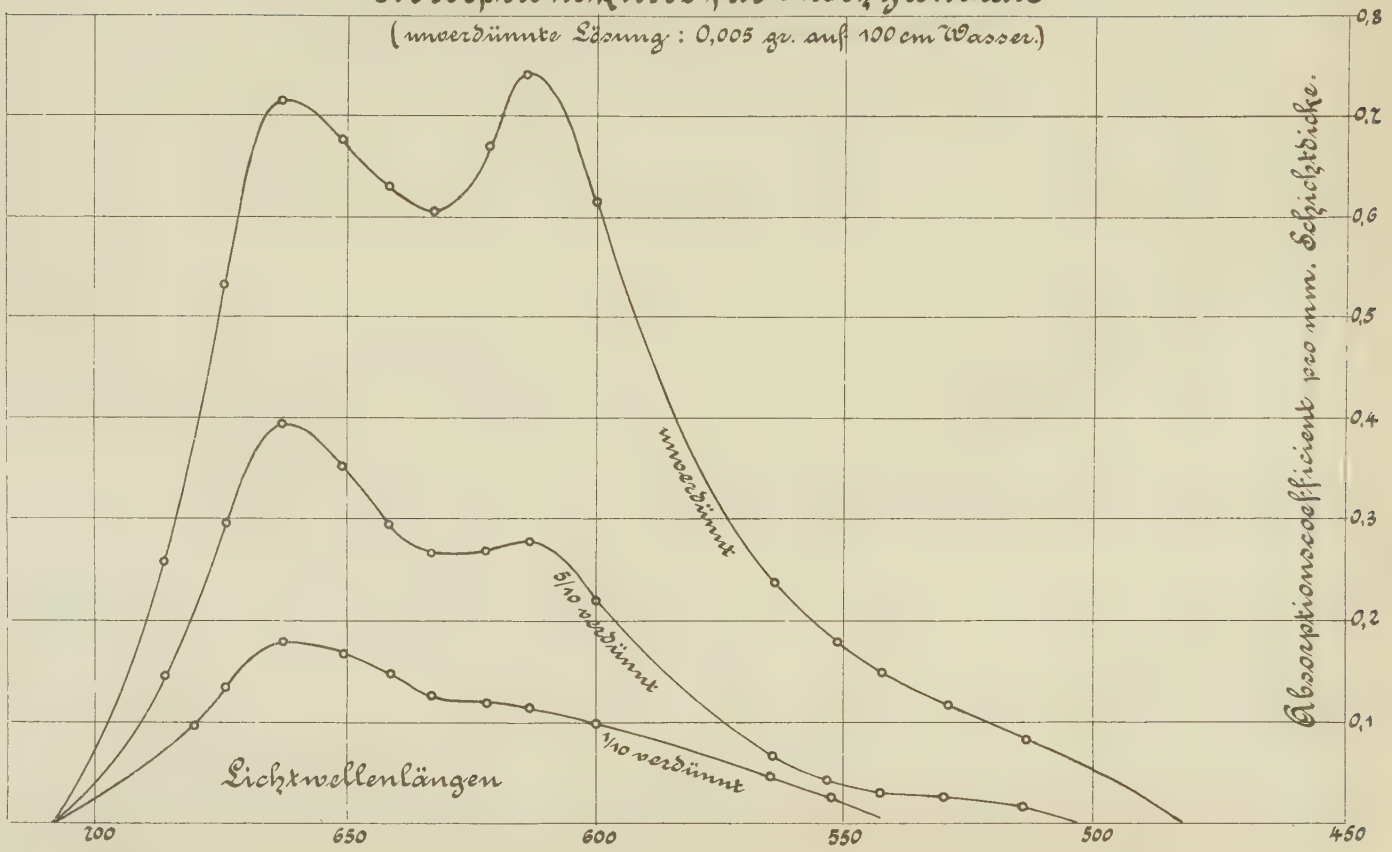
Absorptionskurve für Methylenblau

(0,005 gr. auf 100 ccm. Wasser).



Absorptionskurve für Methylenblau

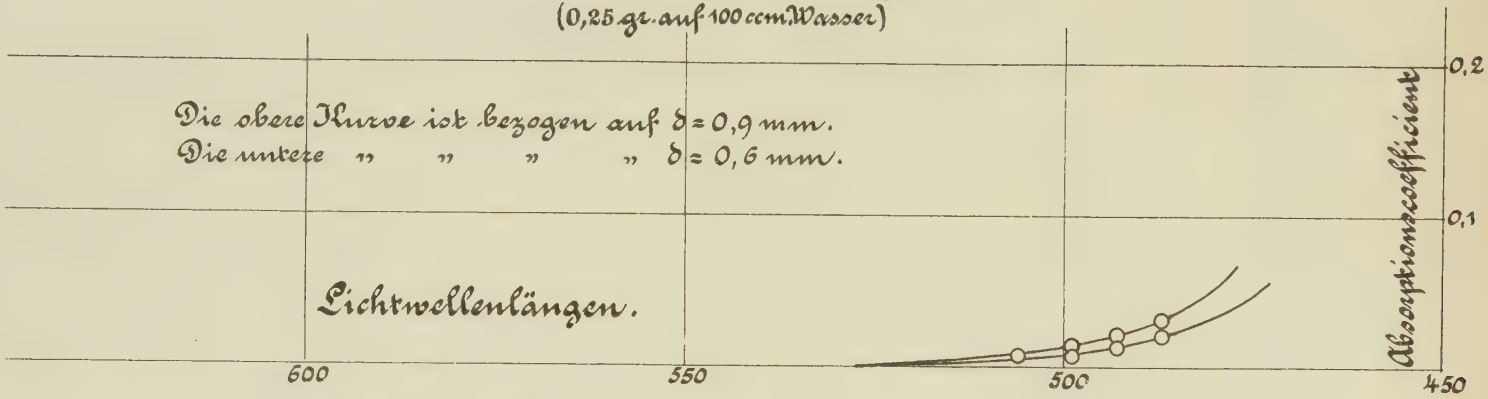
(unverdünnte Lösung: 0,005 gr. auf 100 cm Wasser.)



Taf. III.

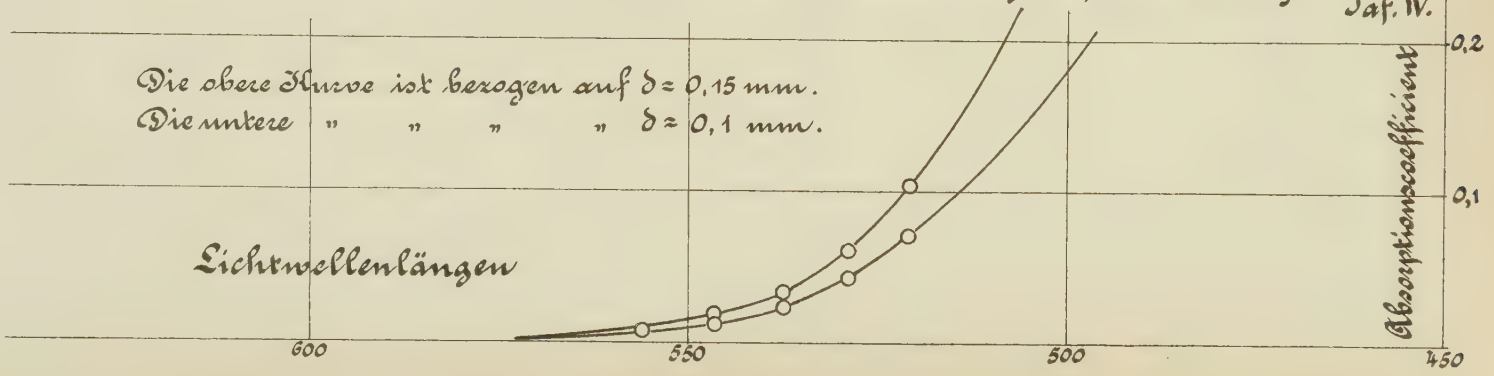
Absorptionskurve für Kaliumchromat

(0,25 gr. auf 100 ccm. Wasser)

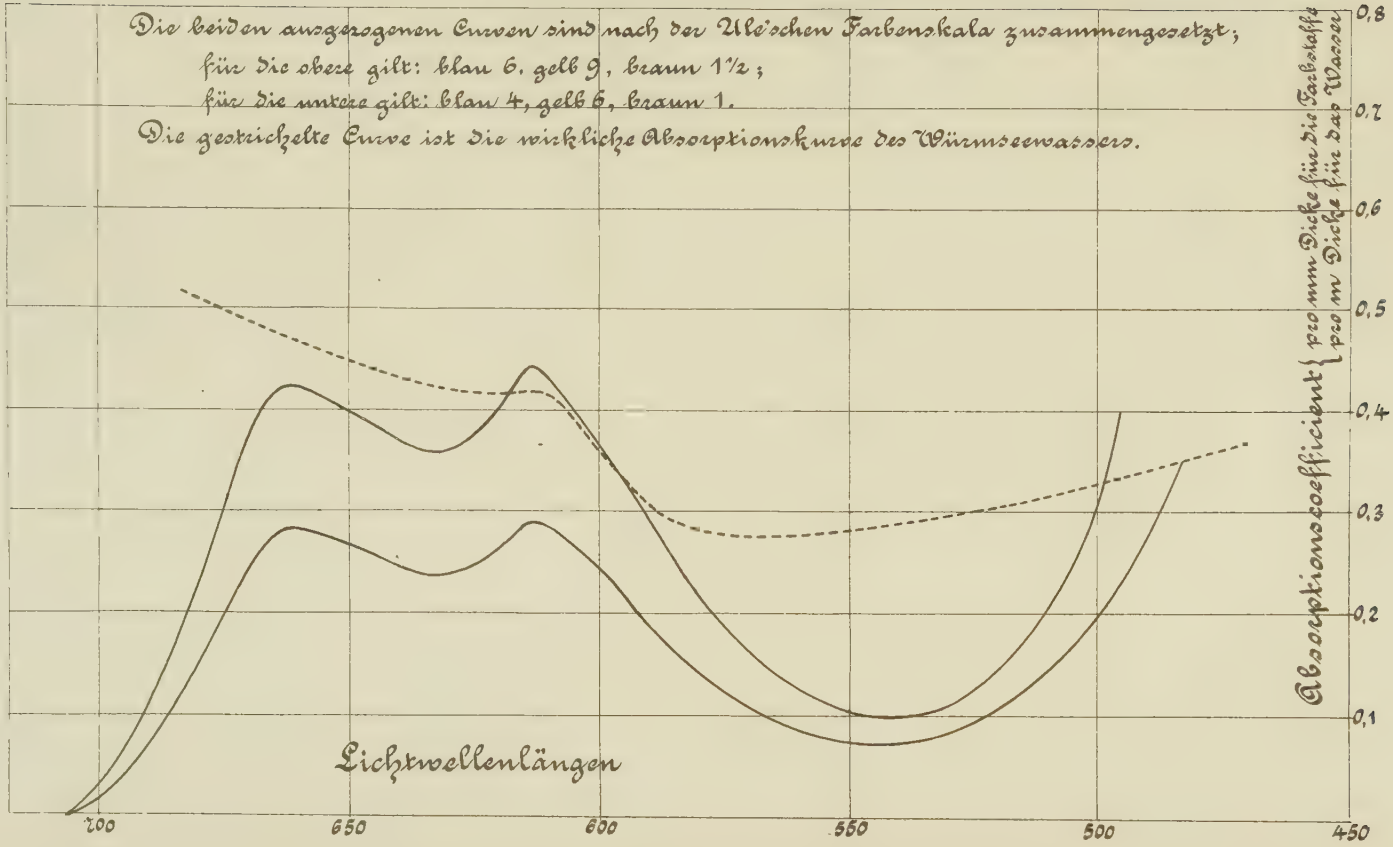


Absorptionskurve für Kaliumdichromat (5,0 gr. auf 100 ccm. Wasser.)

Taf. IV.

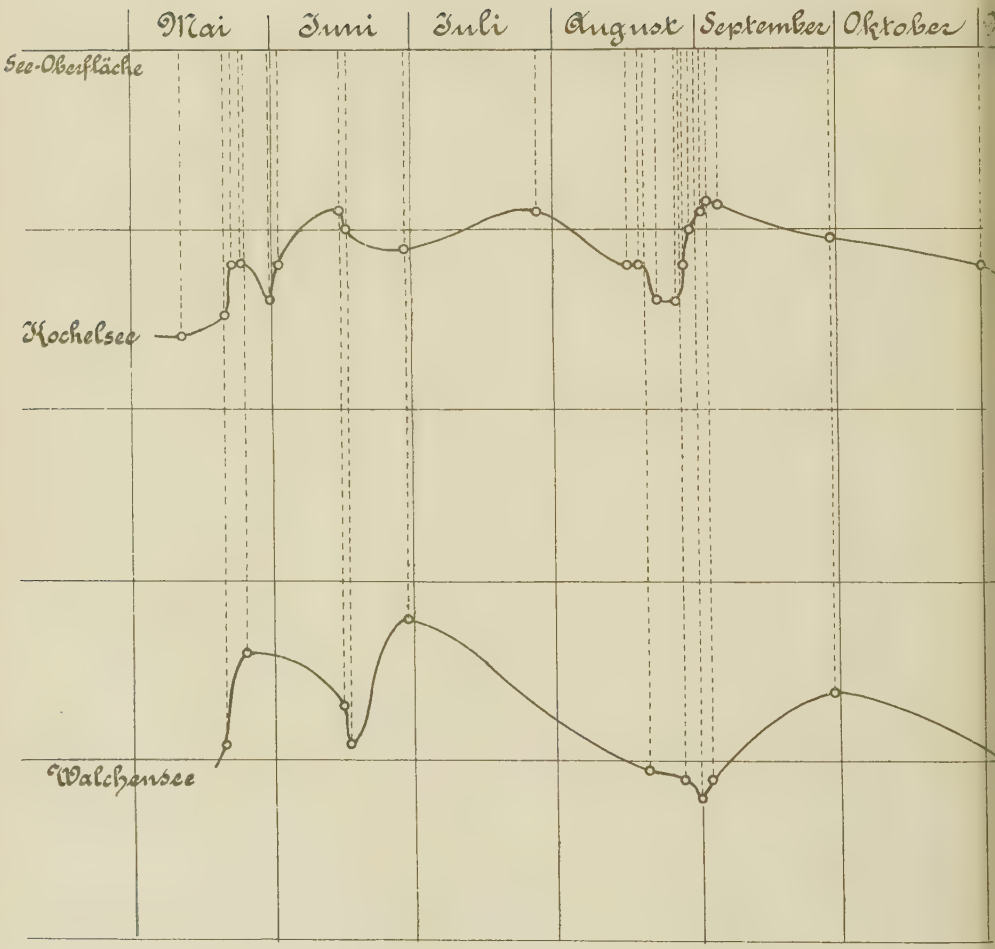


Absorptionskurve für den Würmsee



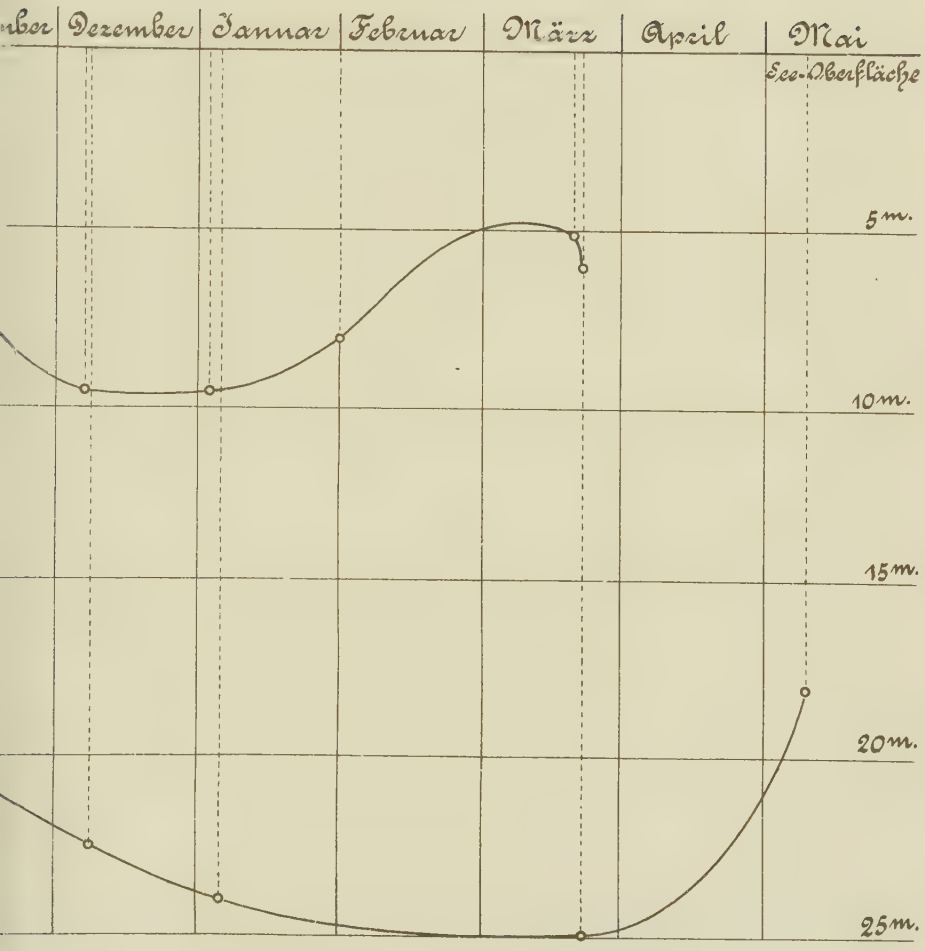
Sicht-Tiefen von Koch

Mai 1902 –



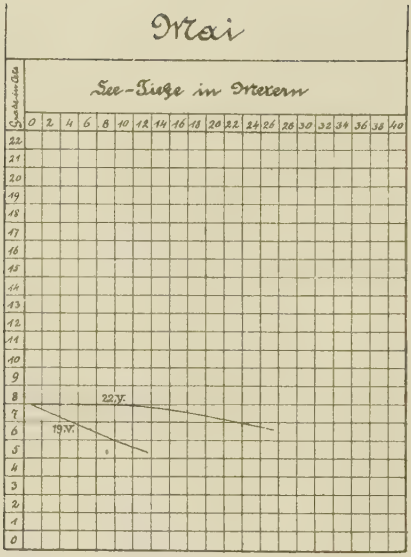
ee und Walchensee.

i 1903.

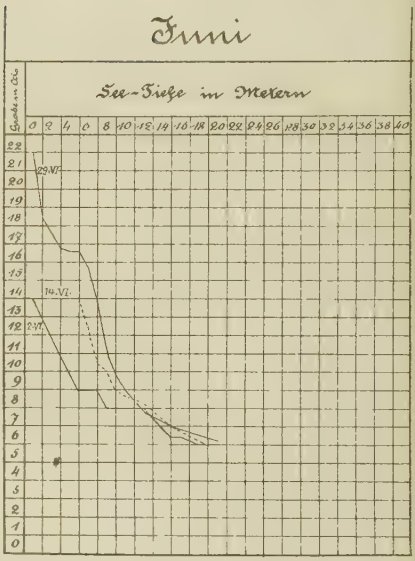


Tiefen-Temperatur

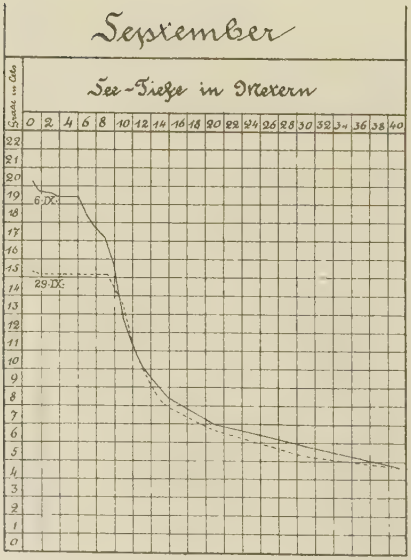
Mai



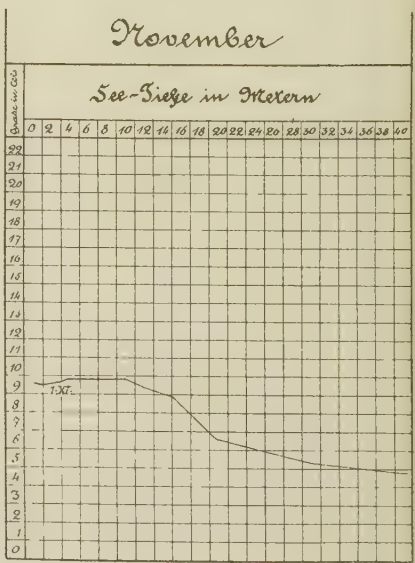
Juni



September

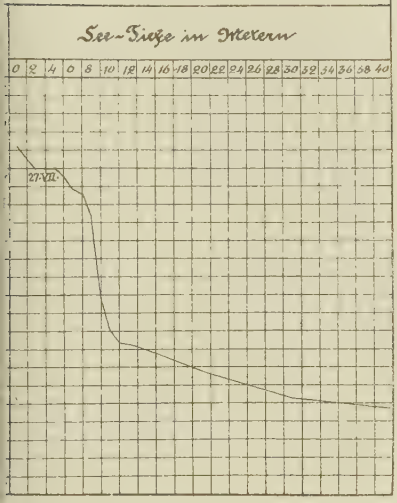


November

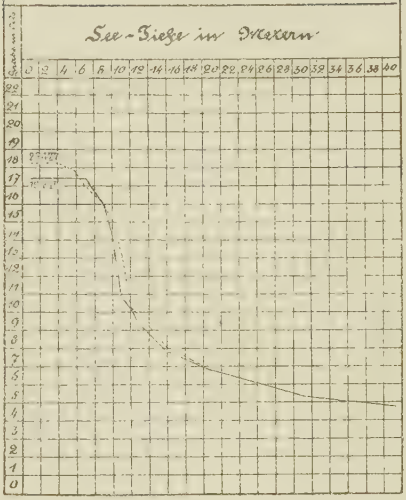


im Kochelsee.

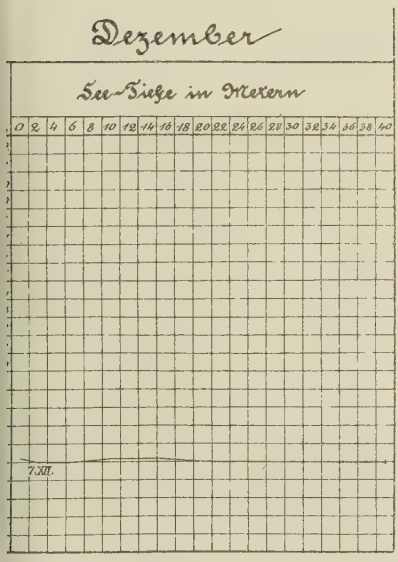
Juli



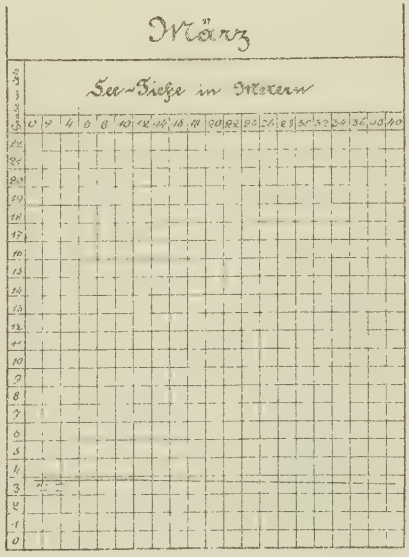
August



Dezember

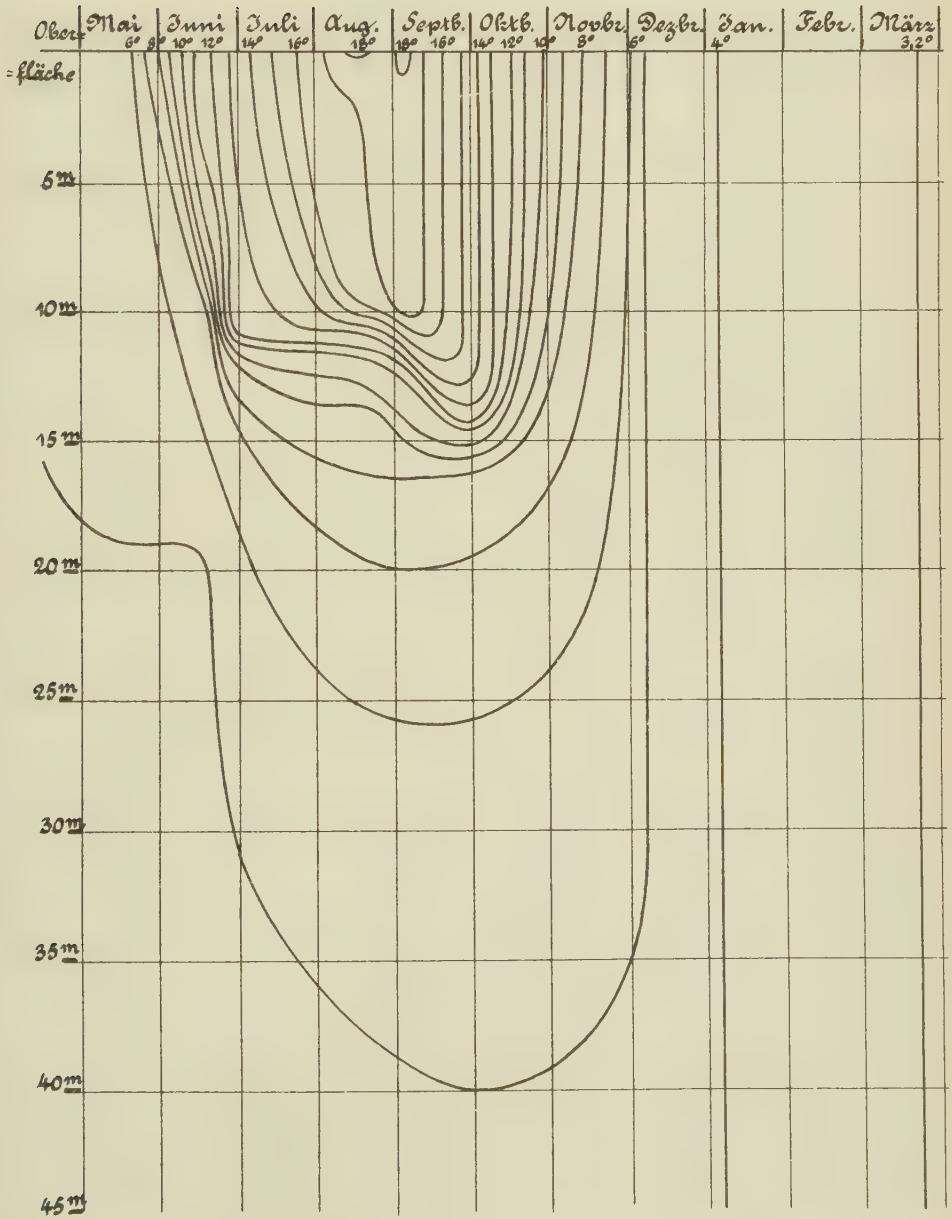


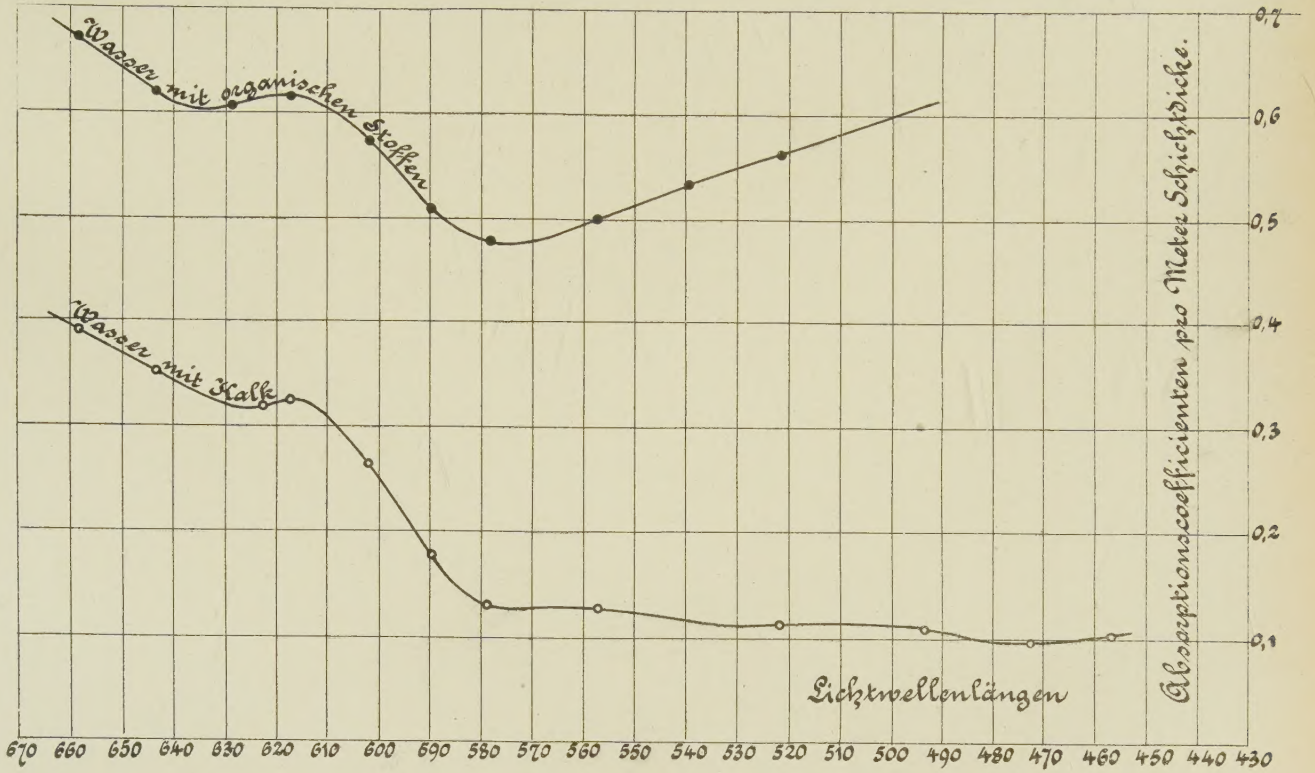
März



Jährlicher Temperaturgang im Walchensee.

nach der Methode der Isoplethen.



Die Wasserfarbe als Farbe trüber Medien.

Lösungen von Kalk und organischen Substanzen in Wasser.